

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

## **FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

### **Aplikace konformního chlazení vstřikovacích forem v procesu vstřikování plastů**

### **Conformal cooling of injection mold application in injection molding**

**Bc. Tomáš Hutla**  
KSP-TP-

Vedoucí diplomové práce: Ing. Luboš Běhálek – *TU v Liberci*  
Konzultant diplomové práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld – *TU v Liberci*

#### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 70  
Počet obrázků: 44  
Počet tabulek: 24  
Počet příloh: 5

**Datum:** 25. 5. 2012



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Bc. Tomáš H U T L A

Studijní program

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor

2303T002 Strojírenská technologie

Zaměření

Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

**Aplikace konformního chlazení vstřikovacích forem v procesu vstřikování plastů**

### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Charakteristika možností temperace vstřikovacích forem. Souhrn poznatků k temperaci vstřikovacích forem systémem konformního chlazení, způsob výroby, možnosti aplikace, apod.
2. Aplikace ocelového tvárníku s konformním chlazením do vstřikovací formy. Teplotní analýza vstřikovací formy při vstřikování polymeru, porovnání konformního chlazení s konvenčním systémem chlazení ocelového a měděného tvárníku vrtaným kanálem.
3. Analýza mechanických vlastností výstřiků při tahovém a ohybovém namáhání v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy.
4. Stanovení vlivu konformního chlazení na obsah krystalického podílu ve struktuře materiálu využitím metod diferenční snímací kalorimetrie a rentgenové difrakce záření X.
5. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuse, závěr.



# ANOTACE

## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

### Fakulta strojní

#### Katedra strojírenské technologie

#### Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Bc. Tomáš Hutla

Téma práce: Aplikace konformního chlazení vstřikovacích forem v procesu vstřikování plastů

Aplication of injection mold conformal cooling in injection molding

Číslo DP: KSP-TP-

Vedoucí DP: Ing. Luboš Běhálek – *TU v Liberci*

Konzultant DP: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld – *TU v Liberci*

**Abstrakt:** Tato diplomová práce popisuje metody temperace vstřikovacích forem a podrobně řeší technologii konformního chlazení a výroby forem pro konformní chlazení. V experimentální části se práce zabývá porovnáním konformního chlazení s konvenčními metodami temperace vstřikovacích forem při experimentálním měření teplotních polí v okolí dutiny formy a hodnocení kvality vstřikovaných dílů.

**Abstract:** This diploma thesis describes a methods of injection mold cooling/heating systems with detailed solution of a conformal cooling technology and injection mold for conformal cooling manufacturing. In experimental part this thesis confronts conformal cooling with conventional cooling methods in experimental heat-field measure in injection mold cavity surroundings and assessment of a injection parts quality.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2012

.....

Tomáš Hutla  
Hlubočská 113  
280 02 Kolín 6

## **Poděkování**

Za morální podporu, vstřícnost a odborné konzultace problémů při tvorbě při této práci děkuji především Ing. Luboši Běhálkovi. Poděkování patří i dalším členům katedry strojírenské technologie za ochotu a spolupráci.

Za dlouhodobou podporu při studiu děkuji především svým rodičům, ale i širšímu okruhu rodiny.

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Teoretická část .....</b>	<b>13</b>
2.1. Temperace vstřikovacích forem.....	13
2.2. Temperační systémy .....	13
2.2.1. Temperace průtokem teplotnosného média .....	14
2.2.2 Temperace kapalným CO <sub>2</sub> – technologie Tool-vac .....	21
2.2.3 Temperace prostřednictvím vírové trubice .....	23
2.2.4 Temperace tepelnými trubicemi.....	25
2.2.5 Temperace prostřednictvím vložek z vysoce tepelně vodivého materiálu.....	26
2.3 Konformní temperace vstřikovacích forem .....	28
2.3.1 Vývoj konformního chlazení .....	29
2.3.2 Technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering).....	29
2.3.3 Materiály pro výrobu forem technologií DMLS.....	31
2.3.4 Konstrukční zásady navrhování kanálů konformního chlazení a příklady aplikací .....	33
<b>3. Experimentální část.....</b>	<b>35</b>
3.1. Charakteristika polymerního materiálu .....	36
3.2. Měření teplotních polí ve formě .....	36
3.2.1. Vstřikovací stroj a konstrukce formy.....	37
3.2.2. Příprava formy na měření teplotních polí.....	39
3.2.3. Technologické parametry stroje a temperační médium .....	40
3.2.4. Průběh měření teplotních polí v dutině formy .....	41
3.3. Stanovení mechanických vlastností výstřiků .....	42
3.3.1. Příprava zkušebních vzorků .....	43
3.3.2. Stanovení tahových a ohybových vlastností.....	44
3.4. Stanovení krystalického podílu ve struktuře materiálu.....	46
3.4.1. Diferenční snímací kalorimetrie .....	46
3.4.2. Rentgenová difrakce záření X .....	51
<b>4. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze .....</b>	<b>57</b>
4.1. Vyhodnocení experimentálního měření teplotních polí.....	57



---

4.2.	Vyhodnocení výsledků zkoušek mechanických vlastností.....	60
4.3.	Vyhodnocení krystalického podílu ve struktuře materiálu.....	63
<b>5.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>65</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>67</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Jednotka	Význam
PP		polypropylen
PVC		polyvinylchlorid
Re		Reynoldsovo číslo
Al		hliník
Be		berilium
C		uhlík
Cu		měď
Sn		cín
Zn		zinek
Co <sub>2</sub>		oxid uhličitý
x <sub>c</sub>	[%]	stupeň krystalinity
$\lambda$	[W/m.K]	součinitel tepelné vodivosti
A <sub>A</sub>	[cts x 2°Theta]	plocha amorfního halo
A <sub>K</sub>	[cts x 2°Theta]	plocha krystalické fáze
I <sub>A</sub>	[cts]	integrální intenzita amorfního halo
I <sub>K</sub>	[cts]	integrální intenzita krystalické fáze
$\Delta H_C$	[J/g]	entalpie krystalizace
$\Delta H_m$	[J/g]	entalpie tání polymeru
$\Delta H_m^*$	[J/g]	entalpie tání plně krystalického polymeru
T <sub>c</sub>	[°C]	teplota krystalizace
T <sub>m</sub>	[°C]	teplota tání
$\sigma_{fM}$	[MPa]	pevnost v ohybu
$\sigma_y$	[MPa]	napětí na mezi kluzu v tahu
$\varepsilon_y$	[%]	jmenovité poměrné prodloužení
E <sub>f</sub>	[MPa]	modul pružnosti v ohybu



## 1. Úvod

V procesu vstřikování termoplastů je doba chlazení tuhnutího materiálu v dutině formy a její teplota jedním z nejdůležitějších faktorů, ovlivňující produktivitu výroby, kvalitu a jakost vstřikovaných dílů. Celý proces vstřikování jednoho kusu plastového dílu vyjádřený v časových jednotkách se nazývá vstřikovací cyklus. V něm jsou vyjádřeny časy všech operací provedených ve vstřikovacím cyklu, a z tohoto časového úseku zabírá doba chlazení více jak jednu třetinu celku – a zároveň je doba chlazení jediným časovým úsekem, se kterým lze operovat a ve významnějším měřítku ovlivnit délku celého cyklu a produktivitu výroby.

Dobu chlazení lze definovat jako čas potřebný ke ztuhnutí taveniny plastu, výstřiku, v dutině formy na (předem definovanou) teplotu vhodnou pro vyjmutí z formy. Tento čas však není možné snižovat (za účelem dosažení vyšší produktivity) bezhlavě, neboť doba chlazení ovlivňuje kvalitu výstřiků, tj. jejich reziduální napětí, tvarovou a rozměrovou přesnost, ale také jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti, přičemž plastový výstřik je nutné chladit rovnoměrně, odpovídající rychlostí ve vztahu k jeho výsledné kvalitě, v závislosti na typu materiálu, tloušťce stěny výstřiku, teplotě formy, teplotě odformování a teplotě taveniny.

Intenzivní a rovnoměrný odvod tepla je nutnou podmínkou pro dosažení požadované kvality výstřiků a hospodárnosti výroby. V technické praxi se lze setkat s celou řadou temperančních systémů vstřikovacích forem. Klasickými konvenčními metodami temperace (nejčastěji přímými vrtanými kanály s cirkulujícím chladícím médiem) nelze vždy v případě tvarově složitějších dílů dosáhnout rovnoměrného odvodu tepla z výstřiku, a doba chlazení je tak závislá na pomalém chladnutí těchto tvarově složitých míst, kde není možné konvenčními metodami zajistit intenzivní odvod tepla. Příkladem obtížně temperovatelných oblastí jsou dlouhé tvárníky forem u výrobků s např. protáhlými dutinami, které se v praxi konvenčním způsobem chladí obvykle tzv. přepážkovým systémem, tj. přímým, kolmo na hlavní chladicí kanál vrtaným kanálem mířícím do tvárníku a podélně rozděleným přepážkou na dvě poloviny, kterými proudí chladicí médium do tvárníku (a zpět do hlavního kanálu). Ani tento systém, zvláště v případě např. kónických stěn tvárníku, však nezaručí intenzivní a rovnoměrné chlazení tuhnutího plastu v dutině formy. Alternativou k výše uvedenému je použití spirálové vložky, tepelné trubice nebo jiného nekonvenčního způsobu chlazení, se kterým lze dosáhnout rychlého (tj. intenzivního), a přitom rovnoměrného chlazení tuhnutího výstřiku v tvarové oblasti dutiny formy.

Tato diplomová práce řeší uvedenou problematiku při aplikaci konformního způsobu chlazení u tvárníku (vstřikovaný díl je kelímek s kónickými stěnami), u něhož je

standardně aplikován konvenční způsob chlazení vrtaným kanálem a plochou přepážkou. Konformní chlazení je velmi perspektivní způsob temperace forem z pohledu intenzity a rovnoměrnosti odvodu tepla, ale také dosažené kvality dílu a jakosti jeho povrchu. Tvarová vložka formy s konformním chlazením je vybavena kanály s cirkulujícím chladícím médiem (tudíž lze tuto vložku aplikovat do formy s klasickým temperačním systémem s cirkulujícím médiem), avšak unikátnost technologie konformního chlazení je v tvaru chladících kanálů – nejde o přímé vrtané kanály, ale o kanály libovolného tvaru i průřezu, které přesně kopírují tvar dutiny formy, a ve všech místech mají stejnou vzdálenost od povrchu tvárníku. Konstrukci chladících kanálů omezuje pouze nutnost zachování mechanické stálosti a tuhosti formy, jinak je jejich tvar i rozmístění zcela na volbě konstruktéra formy (nebo tvarové vložky). Aplikace konformního chlazení je výhodná také po ekonomické stránce, díky celkově kratším časům vstřikovacích cyklů a snížení zmetkovitosti (eliminace tvarových a rozměrových nepřesností, vnitřního napětí, apod.). Existuje řada studií poukazující na úspory v celkových nákladech výroby (vstřikování) ca. přes 10%, avšak vždy záleží na velikosti a geometrii výrobku. V obecné rovině lze říci, že konformní chlazení vede k úsporám v nízko-, středně-, i velkoobjemové produkci.

Cílem této diplomové práce je experimentálně ověřit teoretické poznatky o aplikaci konformního chlazení ve vztahu k intenzifikaci a rovnoměrnému odvodu tepla z nástroje (měřením teplotních polí) a jeho vliv na obsah krystalického podílu ve struktuře výstřiku i jeho mechanické vlastnosti.

Tato práce navazuje na předcházející studie řešené na katedře strojírenské technologie a vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.

## 2. Teoretická část

Tato diplomová práce se ve své teoretické části zabývá popisem temperace vstřikovacích forem. Pojmem temperace u vstřikování plastů rozumíme vyhřívání formy před zahájením vstřikování a chlazení formy, resp. odvod tepla z tuhnutího plastu, vstříknutého do dutiny formy. Teoretická část se zaměřuje na popis temperačních metod vstřikovacích forem z hlediska jejich chladicí účinnosti a rovnoměrnosti chlazení, tedy jedněmi z hlavních faktorů ovlivňujících výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti vstřikovaných plastových dílů.

### 2.1. Temperace vstřikovacích forem

Teplota vstřikovací formy je důležitým faktorem ovlivňující jak průběh vstřikovacího cyklu, tak výsledné vlastnosti výrobku i ekonomii výroby. Teplota formy je řízena temperačním systémem, který před vstřikováním taveniny plastu do formy zajišťuje její ohřev na požadovanou teplotu pro vstřikování konkrétního plastu (a udržení této teploty v požadované toleranci). Během procesu vstřikování ovlivňuje teplota formy zatékavost hmoty (a tím i rychlost plnění dutiny formy) a následně rychlost ochlazování výstřiku.

Úkolem temperačního systému je udržet konstantní teplotní režim formy, tedy jak ohřev formy před vstřikováním, tak ochlazování výstřiku. Doba chlazení zaujímá až jednu polovinu vstřikovacího cyklu a ovlivňuje jak požadované vlastnosti výrobku, tak ekonomickou efektivitu výroby. Z technologického hlediska a požadovaných vlastností výstřiků je vhodnější vyšší teplota formy, která pozitivně ovlivňuje tokové vlastnosti taveniny plastu při plnění dutiny formy a kvalitu výstřiku v podobě tvarové a rozměrové přesnosti, minimalizaci reziduálních napětí, zlepšení povrchových, fyzikálních a mechanických vlastností výstřiků i nadmolekulární strukturu, která se utváří ve fázi chladnutí a tuhnutí taveniny [1, 2]. Z ekonomického hlediska by měla doba chlazení být co nejnižší, aby se zkrátil vstřikovací cyklus, a zlepšila efektivita výroby [3].

### 2.2. Temperační systémy

V následujících kapitolách budou popsány možné způsoby temperace vstřikovacích forem. Mimo obvyklého způsobu *temperace formy systémem vrtaných temperačních kanálů s cirkulujícím teplotnosným médiem* je možné použít také např. systém chlazení forem *kapalným CO<sub>2</sub>*, založený na odpařování kapalného oxidu uhličitého přiváděného zpravidla do mikroporéznicích ocelových částí vstřikovací formy, popřípadě do expanzního prostoru "konvenční" vstřikovací formy [2, 4]. Dalšími

možnostmi temperace forem je použití *Ranque-Hilsch vírové nebo tepelné trubice*. Vírová trubice rozděluje proud stlačeného vzduchu do dvou proudů – studeného a teplého, přičemž se jedná o zařízení s jedinou pohyblivou částí, a to škrtícím ventilem na výfuku horkého vzduchu. Vírová trubice poskytuje rozsah teplot od  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a to pouze použitím filtrovaného vzduchu o teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tlaku  $0,7\text{ MPa}$  [5]. *Tepelná trubice* poskytuje možnost temperace tvarově členitých výrobků, kde by se jinak složitě navrhovaly temperační kanály. V tepelné trubici dochází k vypařování teplotnosného media (čpavku, etanolu, toluenu, apod.) uvnitř trubice, kde pak jako pára proudí do opačné, ochlazovací části, kde kondenzuje, a cyklus se opakuje. K rovnoměrnému a intenzivnějšímu odvodu tepla z tvarových dutin vstřikovací formy je v praxi používáno *vložek z vysoce tepelně vodivých materiálů*. Vložkování se nepoužívá na celé formy, ale na tvarově členité části, kde by se temperační kanály konstruovaly jen velmi těžko [4].

### 2.2.1. Temperace průtokem teplotnosného média

Nejběžnější a nejpoužívanější způsob temperace je systém tvořený temperační a řídicí jednotkou spolu s temperačními kanály ve formě. Temperační kanály jsou přímé, vrtané (nebo frézované) kanály s drsným povrchem pro snadnější dosažení turbulentního proudění teplotnosného media, při kterém dochází k intenzivnějšímu přestupu tepla z formy při proudění teplotnosného media (voda, olej, glykol), které dodává, resp. odvádí teplo ze vstřikovací formy. Kanály mají nejčastěji kruhový průřez, mohou mít i průřez čtvercový, obdélníkový, nebo mezikruhový. Rozmístění a průřez kanálů musí být voleny tak, aby nenarušily pevnost formy. Soustava těchto přímých, navzájem spojených kanálů tvoří temperační systém formy. Mimo formu jsou kanály napojené přívodními hadicemi tak, aby temperační medium mohlo proudit celou soustavou.

Temperační okruh je zpravidla rozdělen na minimálně dva dílčí okruhy, kdy jeden pracuje na pohyblivé, a druhý na pevné části formy. V případě složitější dílu lze temperační okruh rozdělit i na více částí pro zajištění lepšího a rovnoměrnějšího odvodu tepla.

### Skladba temperačního systému

Temperační systém se skládá z temperační a řídicí jednotky, temperačních kanálů, spojovacích a těsnících prvků a cirkulujícího media.

- **Temperační jednotka** (viz obr. 2.1) se používá pro ohřev vody (nebo jiného media, např. oleje) a udržování požadované teploty vstřikovacích forem. Ohřev

zajišťuje trubkové topení, horká voda vystupující z formy je ochlazována přímým přidáváním studené vody. Oběh vody zajišťuje vysokotlaké čerpadlo [8].

- **Řídící jednotka** bývá součástí temperační jednotky. Zajišťuje provozní funkce agregátu a na displeji zobrazuje provozní stavy. Prostřednictvím klávesnice umožňuje ovládat vybrané funkce [2].
- **Teplonosné medium** zajišťuje přenos tepla a udržování formy v požadovaných tepelných podmínkách. Používá se aktivní medium – voda, olej, glykol (viz tab. 2.1). Nejčastějším aktivním médiem je voda, která proudí v temperačních kanálech uvnitř formy. Účinnost přestupu tepla je dána velikostí a kvalitou styčné plochy kanálu, způsobem proudění, a také teplotním rozdílem média. Proudění by mělo být turbulentní ( $Re \gg 2300$ ) a rozdíl teploty média na vstupu a výstupu 3 – 5°C [10].



**Obr. 2.1:** temperační a řídící jednotka [8]

Temperační média lze dělit podle způsobu odvodu tepla ze vstřikovací formy na média aktivní a pasivní.

**Aktivní temperační média** působí přímo ve formě, přivádí nebo odvádí teplo z formy. Množství temperačního média ve formě se řídí pomocí průtokoměrů a teplota pomocí teploměrů. Odvedené teplo je závislé na množství proteklého média, účinnost chlazení je závislá na ploše chladících kanálů, a na jejich vzdálenosti od stěn tvarové dutiny [10, 11].

**Tab. 2.1:** Charakteristika aktivních temperačních prostředků [10]

Typ	Výhody	Nevýhody
<b>voda</b>	dobrý přestup tepla, nízká viskozita, nízká cena, ekologická nezávadnost	použitelné do 90°C (v tlakových okruzích lze používat i vyšší teploty), vznik koroze (lze potlačit upravením vody), usazování vodního kamene
<b>olej</b>	možnost temperace i nad 100°C	zhoršený přestup tepla
<b>glykoly</b>	omezení koroze a ucpávání systému	stárnutí, znečišťování systému

Použití vzduchu jako chladícího média je velmi omezené díky malé účinnosti. Hodí se pouze pro ochlazování povrchu formy a vnitřku dutiny při jejím otevření (volným prouděním), případně pro chlazení tenkých tvárnků, jader, nebo vyhazovačů

(nucené proudění přetlakem, nebo podtlakem). Používá se jen tehdy, je-li použití kapaliny pro nedostatek místa ve formě nemožné.

Temperace elektrickými články se používá zejména při nutnosti temperovat formu na vyšší teplotu, kdy ztráty do okolí jsou větší, než teplo dodané vstřikovaným plastem.

**Pasivní temperační prostředky** ovlivňují tepelný režim formy svými fyzikálními vlastnostmi. Jako pasivní media se často používají tepelně izolační materiály jako izolační vrstvy mezi formou a upínací deskou stroje v případech, kdy požadujeme vysokou teplotu formy. Nejběžnější jsou materiály na bázi vyztužených reaktoplastů, nekovových organických látek apod. (sklotextil). Pasivní temperační prostředky se také s výhodou používají v kombinaci s aktivními prostředky k odvodu tepla z částí formy obtížně temperovatelných (vtokové trysky, tenké tvárníky, apod.), nebo z tvarových částí formy, kde není možné vrtat kanály pro aktivní médium. Používají se materiály s velkou tepelnou vodivostí, jako jsou slitiny Cu, Be, Al ad. [10, 11].

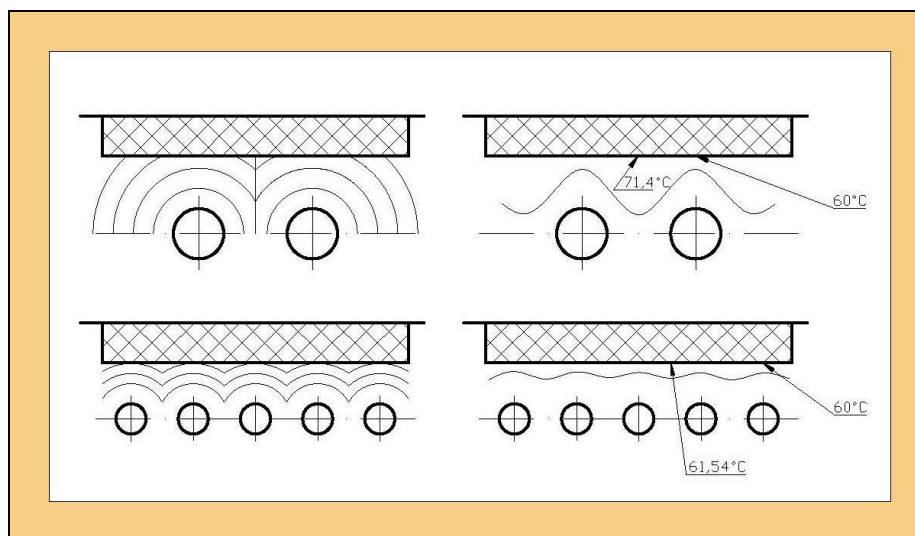
- **Spojovací a těsnící prvky** zabraňují úniku temperačního média do formy, nebo do okolního prostoru. Pro utěsnění se používají „O“ kroužky ČSN 029281 ( pro nepohyblivé částí formy) a ČSN 029280 (pro utěsnění pohyblivých částí formy). Použití kroužků je závislé na výši temperační teploty (běžné kroužky do 80°C). Vyrábějí se do průměru 250mm. Mimo formu se temperační teplota napojuje hadicemi (viz tab. 2.2) utěsněnými na tvarových koncovkách zajištěnými stahovací páskou, nebo šroubovým spojem. Propojující hadice musí odolávat temperačnímu médium, dosahované teplotě a požadovanému tlaku. Pokud je potřeba utěsnit kanály pro jejich správnou funkci, používají se vnitřní nebo vnější těsnící zátky. Všechny části musí mít vhodnou protikorozi ochranu [11, 12].

**Tab. 2.2:** Typy spojovacích hadic [12]

Teplota temperačního média	Druh propojovací hadice
Do 40°C	Měkčené PVC, olejovzdorné pryže (těsnost by měla vyhovovat do tlaku 1MPa)
60 – 120°C	Nízkotlaké letecké hadice (ČSN 37 8221) se šroubovými spoji – s drátěným zinkovým opletem či bez opletu. (těsnost by měla vyhovovat do tlaku 2 MPa)
Nad 120°C	Pancéřované hadice z fluorových kaučuků

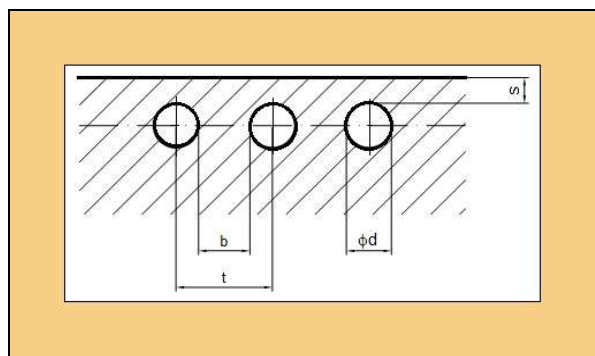
### Obecné zásady konstrukce temperačních kanálů

Rozměry a rozmístění temperačních kanálů se volí tak, aby vzdálenost kanálů od funkční dutiny formy příliš nesnížila tuhost a pevnost stěn dutiny formy. Povrch temperačních kanálů slouží jako plocha pro přestup tepla z povrchu dutiny formy do temperačního média, případně naopak [11]. Je proto vhodnější používat více kanálů s menším průřezem (a menší roztečí), než kanály s větším průřezem (a menší roztečí pro snížení nerovnoměrnosti odvodu tepla) – viz obr. 2.2. Průměr kanálů se volí minimálně 6mm z důvodů nebezpečí ucpání kanálů nečistotami, vodním kamenem, apod. [13].



**Obr. 2.2:** Vliv počtu kanálů a jejich průřezu na rovnoměrnost odvodu tepla z chladnacího výstřiku [13]

Kanály se umísťují v minimální možné vzdálenosti od tvarové dutiny pro nejintenzivnější přestup tepla, a mezi sebou v minimální možné rozteči tak, aby nebyla narušena tuhost formy (viz obr. 2.3 a tab. 2.3).

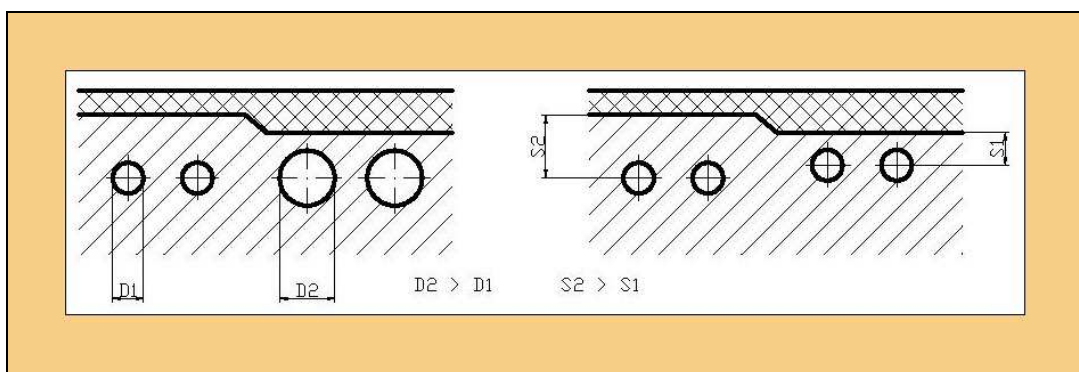


**Obr. 2.3:** Konstruktivní parametry temperačních kanálů (při tlaku v dutině formy 100 MPa) [13]

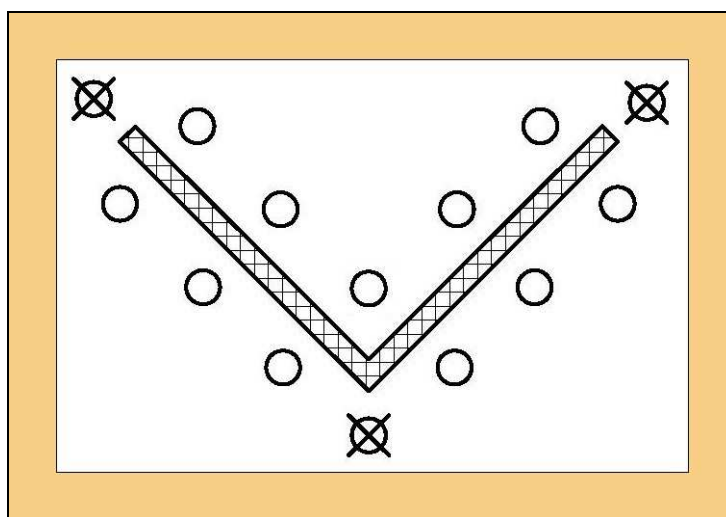
**Tab. 2.3:** Konstrukční parametry kanálů (při tlaku v dutině formy 100 MPa) [13]

$\phi d$ [mm]	6	8	10	12	14	16	18	20
s [mm]	4	6	8	12	15	20	25	30
t [mm]	10	14	17	20	24	27	30	34
b [mm]	4	6	7	8	10	11	12	14

Při změně tloušťky vstřikovaného dílu není vhodné řešit intenzivnější temperaci zvětšením průřezu kanálů, ale přiblížením kanálů o stejném průřezu blíže k dutině formy (viz obr. 2.4). Chlazení výstřiku tak bude rovnoměrnější. Kanály není vhodné umísťovat do hran dílů (viz obr. 2.5), aby v těchto oblastech nedocházelo k rychlejšímu ochlazení výstřiku než v okolních oblastech.



**Obr. 2.4:** Umístění kanálů při různé tloušťce stěny výrobku  
(vpravo vhodnější způsob) [10]



**Obr. 2.5:** Umísťování kanálů v blízkosti hran dílu [10]



Další požadavky na konstrukci kanálů:

- Konstruovat tak, aby bylo temperační médium přiváděno do nejtlustšího místa (obvykle ústí vtoku) tak, aby se teplotní rozdíl ve směru toku snižoval.
- Vzdálenost kanálu od líce formy je až na výjimky stejná, a je omezena velikostí tlaku v dutině formy a přípustným kolísáním teploty.
- Vtoky musí být rozmístěny tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného chlazení výstřiku.
- Po cestě temperačního média se nesmí vytvářet "mrtvé kouty", ve kterých se usazují nečistoty, a jsou ohniska vzniku koroze, která způsobí ucpání kanálů.
- Kanály konstrukčně řešit tak, aby se jednotlivé větve daly navzájem propojit hadicemi. [11, 13]

Z výrobních důvodů je vhodné volit kruhový průměr kanálů, lze však použít i frézované kanály obdélníkových průřezů, kde se musí po celé jejich délce použít těsnění mezi jednotlivými deskami, nebo se do nich vloží tenkostěnné trubky. Pro zvýšení tepelného styku se zalijí nízkotavitelným kovem (Sn, Zn) [10, 11].

### **Intenzita odvodu tepla ze vstřikovací formy**

V průběhu vstřikovacího cyklu funguje forma jako výměník tepla s uzavřeným termodynamickým obvodem. Teplo je do obvodu přiváděno vstříknutou taveninou, a odváděno temperačním systémem, tepelnými ztrátami do okolí a vyhozením výstřiku. Mezi povrchem dutiny formy a povrchem temperačních kanálů probíhá výměna tepla vedením. Po přestupu tepla na povrch temperačních kanálů je teplo do temperačního média odváděno vedením a prouděním. Množství tepla, které projde stěnou formy do (v případě ohřevu z) temperačního kanálu je závislé zejména na tepelné vodivosti materiálu, tloušťce stěny a rozdílu teplot [10, 12]. K intenzifikaci odvodu tepla z dutiny formy pomocí temperačního média lze použít tyto způsoby:

- Aplikaci materiálů forem s vyšší tepelnou vodivostí oproti oceli. Z ekonomických důvodů se z vysoce tepelně vodivých materiálů nevyrábějí celé formy, ale jen jejich části, nebo tvarové vložky do obtížně temperovatelných částí formy, a jako pasivní temperační prostředky doplňují aktivní temperační médium a zvyšují intenzitu temperance formy (viz kap. 2.2.5).

Materiály pro vstřikovací formy se svojí tepelnou vodivostí velmi liší (viz tab. 2.4). Z tohoto pohledu se ocel nejeví příliš vhodná (slitinová ocel  $\lambda_f = 15-52 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  dle podílu legur) oproti např. slitinám mědi (AMPCOLOY), či přímo čisté mědi ( $\lambda_f = 394 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), ale při výběru materiálu formy je nutné zohlednit ekonomické hledisko. Oproti tomu u temperačních médií se tepelné vodivosti příliš neliší (viz tab. 2.5) a jejich

použití závisí na jiných vlastnostech, např. korozní odolnosti, ekologické nezávadnosti.

**Tab. 2.4:** *Součinitel tepelné vodivosti materiálů pro vstřikovací formy [12]*

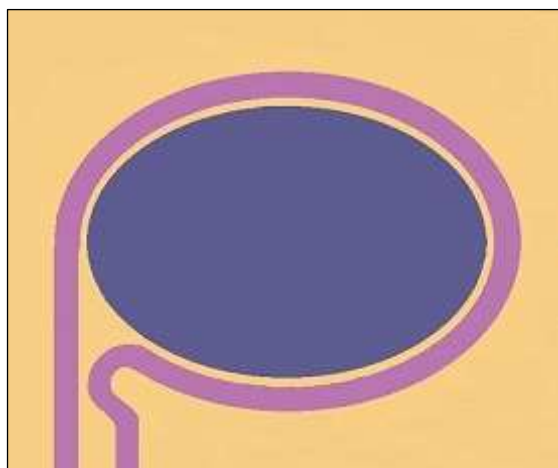
Konstrukční materiál formy	Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]	Poznámky
Uhlíková ocel	50	při obsahu C 0,15% až 0,35%
Slitinová ocel	15 – 52	dle podílu legur
Měď	394	
Bronz	48 – 84	dle složení
Ostatní slitiny mědi (Ampcoloy)	106 – 360	v závislosti na pevnosti
Hliník	222	
Slitiny hliníku	117 – 167	dle složení

**Tab. 2.5:** *Součinitelé tepelné vodivosti temperačních médií [12]*

Temperační médium	Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]	Rozmezí teplot [°C]
Voda	0,552 – 0,666	0 – 200
Etylenglykol	0,304 – 0,259	0 – 60
Transformátorový olej	0,123 – 0,119	40 - 100

- Zvětšení teplotního rozdílu formy a temperačního média, které však naráží na kvalitativní požadavky plastového dílu. Zvětšení teplotního rozdílu (nižší teplota temperačního média) vede k nerovnoměrnému ochlazování výrobku, a tím i ke zhoršení fyzikálně-mechanických vlastností a kvality dílu (nárůst vnitřního napětí, zhoršení tvarové stability, rozdílnosti lesku, apod.). Teplota temperačního média je důležitá zejména u semikrystalických plastů, kde ovlivňuje podíl krystalické fáze ve struktuře polymeru.
- Zintenzivnění průtoku chladicího média tak, aby se zvýšila hodnota Reynoldsova čísla. Při proudění však nesmí dojít ke kavitačnímu jevu, který by mohl způsobit poškození chladicích kanálů [17].
- Velikostí teplosměnné plochy temperačních kanálů, která má vliv na množství odvedeného tepla. Větší teplosměnná plocha odvede více tepla z dutiny formy. Možnosti přímých vrtaných kanálů jsou ohledně zvyšování teplosměnné plochy omezené, zvětšování průměru kanálů má svá konstrukční omezení. Zvětšit plochu temperačních kanálů lze velmi účinně výrobou formy technologií *DMLS* (*Direct*

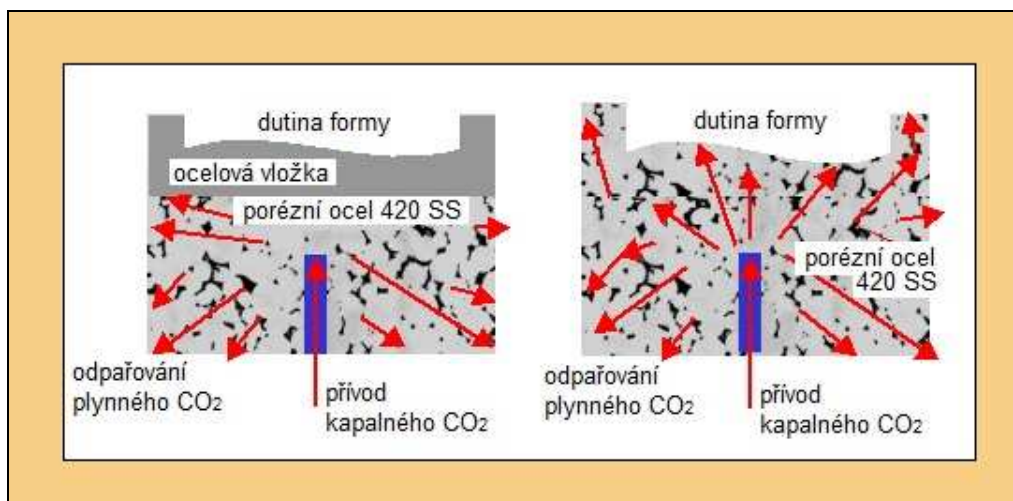
*Metal Laser Sintering*), která nabízí velké možnosti z hlediska tvaru i umístění kanálů (viz obr. 2.6). Technologie *DMLS* staví požadovanou geometrii po vrstvách podle 3D modelu, kdy energie laseru taví kovový materiál v podobě prášku pouze v oblasti geometrie dílu. Pokud kanály vyrobené (resp. forma vyrobená) technologií *DMLS* sledují tvar dutiny formy, hovoříme o tzv. konformním chlazení (viz kap. 2.3.) [12, 14].



**Obr. 2.6:** Princip kopírování tvarové vložky  
temperačními kanály u technologie *DMLS* [15]

### 2.2.2 Temperace kapalným $\text{CO}_2$ – technologie *Tool-vac*

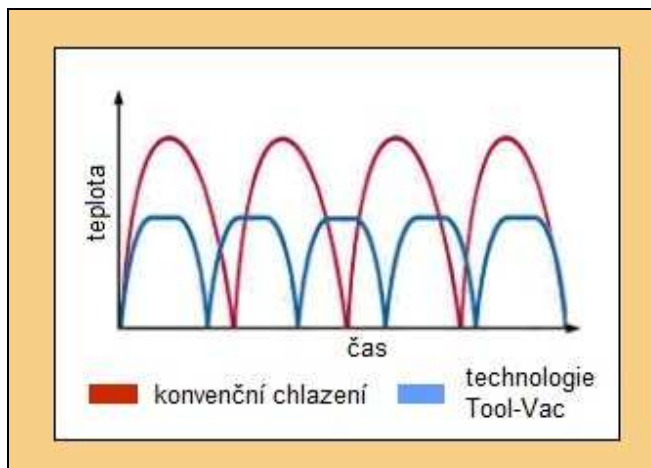
Technologie *Tool-vac* je způsob temperace založený na odpařování kapalného oxidu uhličitého přiváděného zpravidla do speciálních mikroporézních ocelí, popřípadě do expanzních prostorů konvenční formy (viz obr. 2.7). Technologii vyvinula německá firma *Foboha Werkzeugbau GmbH*. ve spolupráci se švédskou firmou *AGA Gas AB*. Kapalným  $\text{CO}_2$  se odpařuje do mikroporézních ocelí značky "*Toolvac-Stahl*". Oxid uhličitý se přivádí do formy v časových impulzech tak, aby bylo dosaženo potřebné teploty dutiny formy, trubičkami o průměru 0,3 – 0,5 mm. Ve formě pak proniká póry oceli (v případě mikroporézní vložky) a expanduje. Vzniklé výparné teplo umožňuje rychlý odvod tepla z chlazeného výstřiku. V případě použití konvenční formy je  $\text{CO}_2$  přiveden do expanzního prostoru formy, kde se odpařuje. Na rozdíl od mikroporézní oceli nemůže být oxid uhličitý veden skrz ocelovou stěnu, ale k sdílení tepla slouží jen povrch stěn expanzního prostoru (viz obr. 2.7). Zásobník  $\text{CO}_2$  s kompresorem dodávajícím kapalným oxid uhličitý bývá umístěn mimo vstřikovnu. Proces je řízen přístrojem, umístěným ve formě. V případě uzavřeného systému se plynný  $\text{CO}_2$  zkapalňuje, a vrací do oběhu [4].



**Obr. 2.7:** Princip přivádění a vypařování kapalného  $\text{CO}_2$  u formy s tvarovou vložkou z konvenční oceli (vlevo), a formy vyrobené z mikroporézní oceli (vpravo) [18]

Vzhledem ke struktuře dutiny formy z mikroporézního materiálu nedosahuje povrch vstřikovaného dílu dokonalého lesku, a to ani po přeleštění povrchu diamantovou pastou, čímž lze také snížit prodyšnost povrchu materiálu až o 30%. Pokud z kvalitativních požadavků není možný přímý styk výstřiku s mikroporézní ocelí, jsou mikropóry utěsněny mechanicky, nebo pomocí plastu, a odpařený  $\text{CO}_2$  se odvádí vrtanými kanály [4].

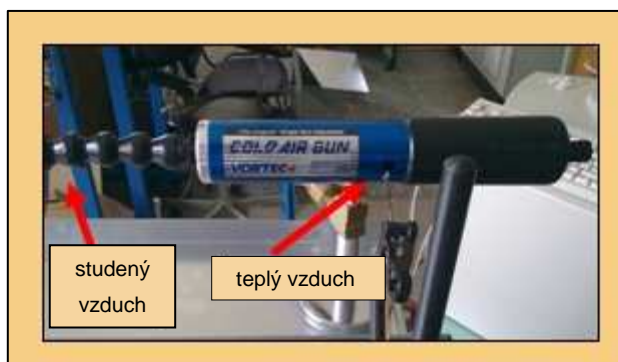
Technologie *Tool-vac* se obvykle používá společně s konvenčními temperačními kanály pro chlazení tlustostěnných oblastí vstřikovaného dílu, tedy v místech, kde hmota chladne nejpomaleji. Příklad použití je chlazení tlustostěnných částí u dílů vyráběných technologií *GIT*. Dle praktických pokusů lze touto aplikací technologie *Tool-vac* zkrátit dobu chlazení až o 40% (viz obr. 2.8). Tato metoda je také vhodná pro temperování dlouhých tenkých tvárnků, nebo tvárnků o velikém průměru. Vedle snížení doby chlazení jsou další výhody technologie *Tool-vac* vyšší kvalita povrchu díky rovnoměrnému rozložení teplot, nahrazení složité konstrukce konvenčních vrtaných kanálů flexibilně umístěnými trubičkami pro přívod  $\text{CO}_2$ , a možnost použít pórovitost oceli pro odplynění výstřiků. Důležitá je také rychlá návratnost investice do technologie a formy. Nevýhodou této technologie je (kvůli pórovitému povrchu dutiny formy) nutnost dodatečné úpravy povrchu vstřikovaného dílu pro dosažení vysoké jakosti povrchu, vysoké nároky na čistotu při montáži nástroje, ošetřování nástroje konzervačními prostředky při prostojích stroje, a únik  $\text{CO}_2$  do okolí v případě otevřeného oběhu [4].



**Obr. 2.8:** Příklad rozdílné doby chlazení  
(a tím zvýšení produktivity výroby) u technologie

### 2.2.3 Temperace prostřednictvím vírové trubice

Ranque-Hilsch vírová trubice je jednoduché zařízení bez jakýchkoliv pohyblivých částí (s výjimkou jednoho škrťacího ventilu na horkém výstupu), do kterého vstupuje pouze stlačený vzduch o pokojové teplotě (0,7 MPa, 20 °C), který se uvnitř trubice rozděluje na 2 frakce – teplou a studenou, které vystupují na opačných stranách trubice (viz obr. 2.9) [19]. Škrťacím ventilem na horkém výstupu lze regulovat poměr teplého a studeného vzduchu, a tím i teplotu na výstupu studeného vzduchu, který se bere jako pracovní, a jež může mít teplotu až -46 °C. Horký vzduch, vystupující na opačném konci trubice, se bere jako odpadní; využití vírové trubice je tedy



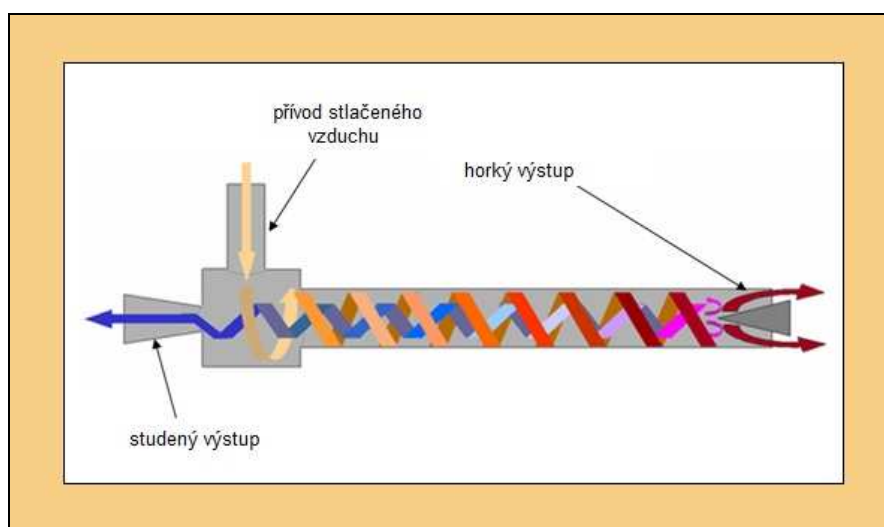
**Obr. 2.9:** Příklad vírové trubice z laboratoře katedry  
energetických zařízení

především chlazení výrobků, nebo strojích částí ve výrobních procesech (lze však použít i horký vzduch). Vírová trubice má více jak 1000 uplatnění v různých provozech, v plastikářském průmyslu jde o netradiční způsob chlazení, který ale již našel uplatnění ve chlazení forem, v chlazení vytlačovaných a vyfukovaných výrobků, v chlazení spoje po svařování plastových sáčků apod. [4].

K prvnímu objevu činnosti vírové trubice náhodně při experimentální činnosti již v roce 1928 francouzský student fyziky Georges Joseph Ranque, a popsal její činnost. V této době vírová trubice však příliš uplatnění nenalezla, až v roce 1945 ji „znovuobjevil“ německý fyzik Rudolf Hilsch, a toto zařízení tedy nese název "Ranque-

*Hilsch vírová trubice*". Od roku 1961 vyrábí patentovaně vírové trubice americká firma *Vortec*, a tak se lze setkat i s názvem "*Vortec vírová trubice*" [19]. Za uvedení stojí zajímavost, že již v 19. století fyzik James Maxwell hovořil o „příjemném, malém démonu“, rozdělujícím v jednom zařízení vzduch na studený a horký proud [4].

Princip činnosti vírové trubice stále není zcela jednoznačně definován, ale podle všeobecně přijímané teorie stlačený vzduch (0,7 MPa) vstupuje do trubice tangenciálně vrtaným stacionárním generátorem, a rotuje podél vnitřní stěny k horkému výstupu rychlostí až 1000 000 ot/min, kde část vzduchu vystupuje skrz škrtkový ventil. Zbývající část vzduchu je tlačena zpět středem trubice ke studenému výstupu, přičemž tomuto proudu vzduchu dál odebírá teplo horký vzduch, rotující podél vnitřní stěny trubice [4].



**Obr. 2.10:** Princip činnosti vírové trubice [18]

Jsou známa měření, kdy byl místo vzduchu použit jiný plyn, a trubice opět fungovala. Maximální teploty, dosažené na výstupech trubice, jsou  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$  na studeném a  $+127\text{ }^{\circ}\text{C}$  na horkém výstupu (viz obr. 2.10). Lze po užívat i vzduch o nižším tlaku, trubice však bude pracovat s nižším chladícím výkonem. Při přetlaku 0,1MPa má trubice již jen velmi malou účinnost, nicméně pracuje.

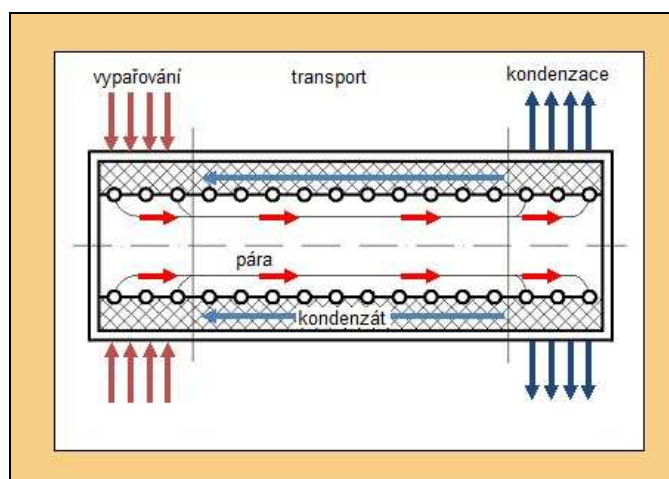
Výhody vírové trubice spočívají především v obrovských možnostech aplikace v různých oblastech průmyslu, nejen plastikářského. Výhodou je okamžitý náběh, nízká pořizovací cena, spolehlivost (minimální údržba), ekologie provozu (vstup je pouze stlačený vzduch) a také velmi vysoká přesnost – při konstantním tlaku je možné ve výrobních provozech udržet teplotu na studeném, i horkém výstupu v rozmezí  $\pm 0,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nevýhoda vírové trubice je její hlučnost (otáčky vzduchového proudu v trubici dosahují až rychlosti zvuku). Pro eliminaci hlučnosti se může na studený výstup montovat tlumič hluku [4].



Aplikací *Ranque-Hilsch vírové trubice* v chlazení vstřikovacích forem se na katedře strojírenské technologie zabývala práce [22], která v závěru poukazuje na další nevýhody této metody, zjištěné při experimentálním měření. Jde zejména o obtížnou temperaci formy na provozní teplotu a zvyšování teploty v nástroji během vstřikování. V závěru práce autor dále navrhuje provedení dalších experimentů a navrhuje možnost využití vírové trubice k lokální temperaci v místech výstřiku s výraznou nehomogenitou teplotního pole.

## 2.2.4 Temperace tepelnými trubicemi

Chlazení forem pomocí tepelných trubic se používá především při vstřikování tvarově složitých dílů, kde by se konvenční temperační kanály konstruovaly jen velmi těžko, nebo by jejich použití vůbec nebylo možné. Tepelná trubice s hliníkovým, ocelovým, nebo měděným pláštěm umožňuje přenos tepla z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s nižší teplotou, a to i při jejich malém rozdílu teplot v těchto oblastech [19].



Obr. 2.11: Princip činnosti tepelné trubice [19]

V teplejší části trubice dochází k vypařování teplotnosného média (vody, etanolu, čpavku, pro vyšší teploty toluen či sodíku) a k intenzivnímu odvodu tepla od dutiny vstřikovací formy. Pára teplotnosného média proudí na opačný (ochlazovaný) konec trubice, kde kondenzuje, a výparné teplo se odvádí do okolí. Kondenzát se pak kapilárními (nebo také gravitačními a odstředivými) silami vrací zpět do výparné části, a cyklus se opakuje (viz obr. 2.11). Tepelná trubice má tedy část výparnou a kondenzační, které odděluje část adiabatická [20, 21].

Dle způsobu zajištění toku kondenzátu do výparné části se tepelné trubice dělí na tři základní typy:

- gravitační, kdy kondenzát stéká do výparné části po hladké stěně působením gravitačních sil. Trubice musí být ve vertikální (nebo skloněné) poloze s kondenzační částí nad výparnou.
- rotační, kdy do výparné části proudí kondenzát vlivem odstředivého zrychlení
- a kapilární trubice, zpravidla vodorovné, ale do omezené výšky jsou schopné pracovat i proti gravitaci

Intenzita odvodu tepla závisí na volbě teplotnosného média a materiálu pláště trubek. Použitím tepelné trubice bylo v praxi dosaženo zkrácení pracovního cyklu až o 30% [12]. Malý průměr tepelné trubice (od 2 do 20ti mm) a její délka (50 – 300 mm) ji upřednostňují pro zejména pro chlazení dlouhých a tenkých tvárnků. Aplikací tepelných trubic se na TU zabývala diplomová práce [21], kde autor v závěru práce shrnuje experimentálně ověřené poznatky a hodnotí aplikaci tepelné trubice do procesu vstřikování – na chlazení tuhnoucího plastu – jako vhodnou alternativu ke konvenčním systémům temperace navíc s jistým kvalitativním posunem vstřikovaných dílů v hodnocených mechanických vlastnostech [21].

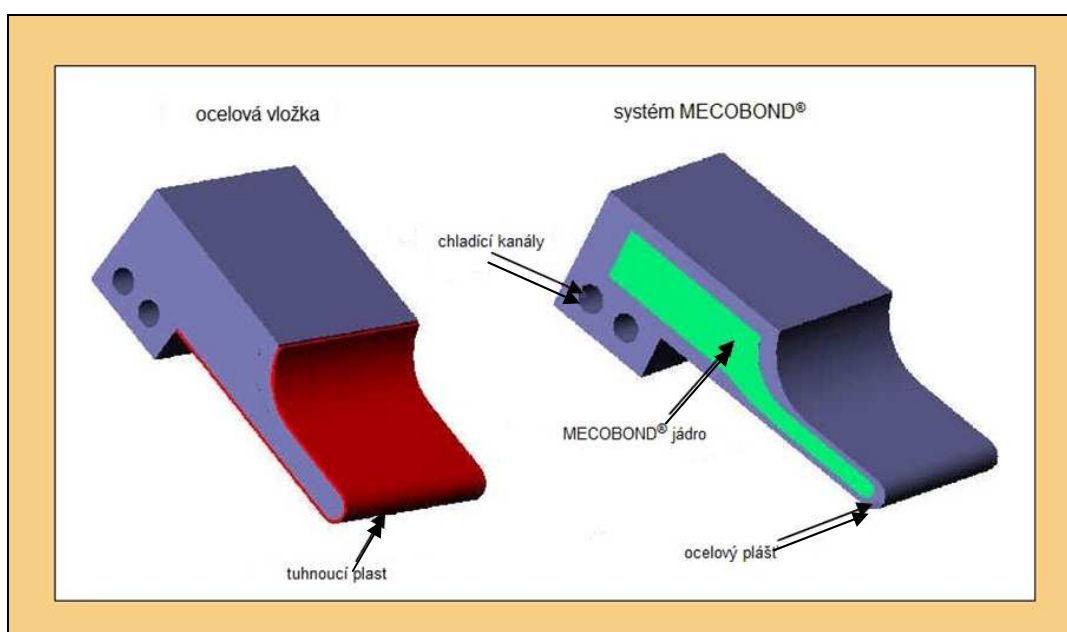
### **2.2.5 Temperance prostřednictvím vložek z vysoce tepelně vodivého materiálu**

Vložkování forem vysoce tepelně vodivými materiály je způsob temperance používaný především ve tvarově složitých a těžko dostupných částech formy. Ve většině případů tyto vložky vhodně doplňují temperační systém s aktivním temperačním médiem (vodou). Princip této metody spočívá v nahrazení tvarové části formy (která by byla konvenční metodou jen velmi obtížně uchladitelná) vložkou z vysoce tepelně vodivého materiálu, který bude odvádět teplo z dané oblasti výstřiku [4, 20]. Použitím tvarových vložek lze docílit rovnoměrného odvodu tepla z dutiny vstřikovací formy (zejména při nižších teplotách temperace), tím zajistit rovnoměrné teplotní zatížení výstřiku i nástroje (formy) a zvýšení produktivity práce zkrácením vstřikovacího cyklu, v některých případech až o 25%. Při fázi vstřikování je díky lepší temperaci formy nespornou výhodou lepší zatečení taveniny plastu do tvarově složitých míst (které jsou díky tepelné vložce lépe vyhřívány) a zamezení vzniku studených spojů (při pomalém obtékání např. výstupků ve formě). Zlepšení odvodu tepla lze docílit nejen pomocí vložky z tepelně vodivého materiálu, ale i nástřikem vrstvy tohoto materiálu do tvarové dutiny formy. Mechanické vlastnosti takovýchto vrstev jsou však nižší než u nástrojových ocelí, a dochází tak k jejich

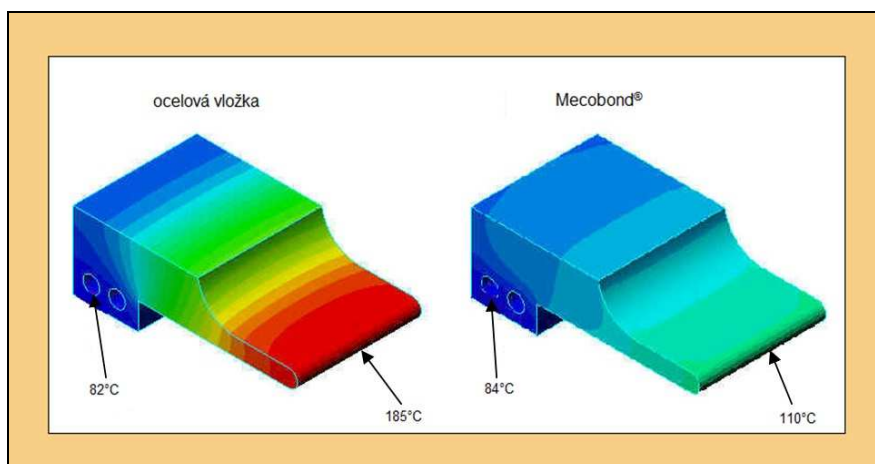


rychlejšímu opotřebení [4, 20]. Rovněž tvrdost samotných vložek z vysoce tepelně vodivých materiálů je oproti oceli výrazně nižší.

Možností, jak zvýšit odolnost tvarových vložek proti opotřebení, je **systém Mecobond**. Jde o variantu konstrukce tvarových vložek, kdy je požadováno, aby tvarová vložka měla vysokou tepelnou vodivost v celém objemu materiálu a zároveň vyhovující mechanické vlastnosti, čehož bylo dosaženo spojením dvou materiálů, oceli a mědi (viz obr. 2.12). Ocel tvoří vnější plášť (který lze povrchově upravovat tepelným zpracováním), čímž je zajištěna mechanická stabilita a ochrana proti opotřebení, měděné jádro slouží pro rychlý a rovnoměrný odvod tepla (viz obr. 2.13). Oba materiály jsou dokonale difusně spojeny.



**Obr. 2.12:** Princip systému MECOBOND® ve srovnání s konvenční vložkou [23]

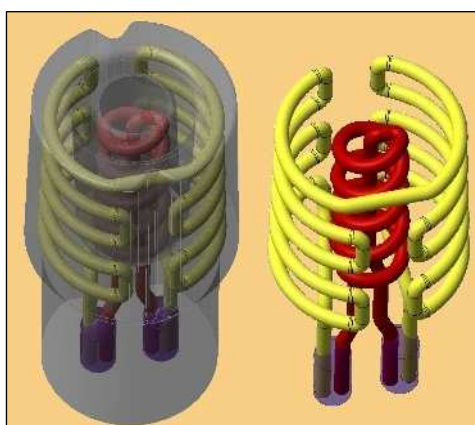


**Obr. 2.13:** Simulace teplotních polí na povrchu vložky MECOBOND® ve srovnání s konvenční ocelovou vložkou [23]

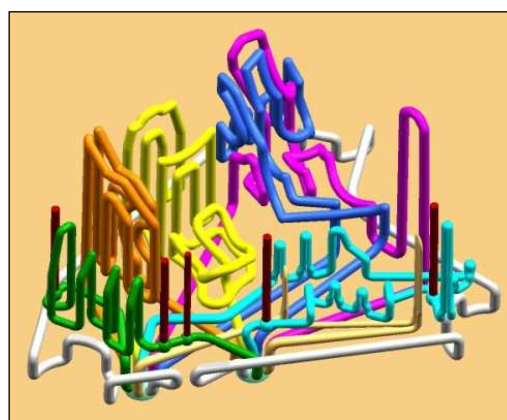
Experimentální studie aplikace systému Mecobond v procesu vstřikování plastů poukazují na možnosti zkrácení doby chlazení (a tím také doby cyklu) až o 50%. Tento faktor se ve výsledku podílí na celkovém snížení výrobních nákladů při vstřikování plastů, a to i přes zvýšené náklady spojené s výrobou tvarové vložky systémem Mecobond (v závislosti na konstrukci formy ca. o 10%) [23].

## 2.3 Konformní temperace vstřikovacích forem

Konformní temperace je způsob chlazení (vyhřívání) vstřikovacích forem tradičními temperačními médii (viz kap. 2.2.1), kdy chladicí kanál přesně kopíruje v dané vzdálenosti tvar dutiny formy bez tvarového omezení – vyjma zachování mechanické pevnosti formy (viz obr. 2.14). Temperační okruh lze podle potřeb dělit do dílčích okruhů tak, aby byl zajištěn rovnoměrný odvod tepla z dutiny formy. Členění temperačního okruhu je vhodné zejména v případě složitých a velkoplošných dílů, kde jsou v různých částech formy rozdílné nároky na odvod tepla, a chladicí kanály mohou být vhodně rozmístěny tak, aby docházelo k rovnoměrnému odvodu tepla z výstřiku, a nedocházelo k jeho tvarovým a rozměrovým změnám. Příklad temperace tvarově velmi složitých dílů pomocí konformního chlazení je na obr. 2.15.



**Obr. 2.14:** Konformní temperace vstřikovacích forem [24]



**Obr. 2.15:** Možnosti konformní temperace (zde s kombinacemi tepelných trubic) [25]

Složitost tvaru temperační soustavy nehraje u výroby forem či tvarových vložek s konformním chlazením roli, proto jsou možnosti konstrukce chladících kanálů téměř neomezené. S možnostmi konstrukce chladících kanálů souvisí i další výhody plynoucí z aplikace konformního chlazení, jako vysoká kvalita vstřikovaných dílů, snížení zmetkovitosti, značné zkrácení doby chlazení (a tím vstřikovacích cyklů), zvýšení produktivity výroby, a v neposlední řadě značné finanční úspory plynoucí z uvedených faktů.

Unikátnost forem s konformním chlazením spočívá v jejich výrobě technologií *DMLS* (*Direct Metal Laser Sintering – Laserové spékání*), založené na principu výroby pevného kovového dílu spékáním kovového prášku podle 3D modelu. Výrobou, použitím, výhodami, a aplikacemi technologie konformního chlazení s názornými příklady se zabývají následující kapitoly.

### 2.3.1 Vývoj konformního chlazení

Nejstarším známým systémem konformní temperace vstřikovacích forem je systém *Contura*, vyvinutý firmou *Innova Zug – Engineering GmbH*, kde se 3D model počítačově rozdělí na jednotlivé vrstvy, které se pak vyrábí konvenčními technologiemi jako tenké segmenty s částmi kanálů, které se následně svařují, a tím vzniká forma s nepřímými kanály. Vrstvy se spojují speciální technikou pájení v podtlaku (ve vakuu), čímž vznikne vzduchotěsný spoj a homogenní forma (tvarová vložka formy). Takováto výroba byla velmi nákladná, a navíc se snižovala životnost formy, protože spoje korodovaly. S příchodem technologie *DMLS* se výroba temperačních kanálů kopírující obrys tvarové vložky zjednodušila. Tvarové vložky zhotovené spékáním práškového kovu po vrstvách o tloušťce 20-40  $\mu\text{m}$  lze vyrobit bez ohledu na složitost geometrie jednotlivých kanálů v jedné operaci [4, 12, 26]. V České republice se jako jediná technologií *DMLS* a konformním chlazením zabývá firma *INNOMIA a.s.* Laserové spékání provádí na stroji *EOSINT M270* (viz kap. 2.3.2) s použitím materiálů *MS1* (*Martenzitická ocel*), *nerezové oceli SS* a *bronzové slitiny DM 20* (charakteristika materiálů viz kap. 2.3.3) [30].

### 2.3.2 Technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Technologie laserového spékání kovového prášku (*DMLS*) patřila původně do skupiny metod *Rapid Prototyping*, tedy rychlé výroby modelů, prototypů a komponentů přímo na základě počítačového 3D modelu. Vývoj technologií *Rapid Prototyping* se datuje od roku 1986, kdy americká společnost *3D Systems* přišla s technologií *stereolitografie* (postupné vykreslování 2D vrstev na hladinu pryskyřice laserovým paprskem). Technologie *DMLS* pak byla pro výrobu prototypů vynalezena v roce 1994 firmami *Rapid Product Innovations (RPI)* a *EOS GmbH*. V plastikářském průmyslu se technologie *DMLS* používá přibližně od roku 2005 (viz kap. 2.3.1) [28].

**Proces výroby formy** technologií *DMLS* začíná konstrukcí 3D modelu tvarové vložky, nebo celé formy, jejíž velikost je ovlivněna pracovním prostorem stroje. Po provedení simulací pro ověření funkčnosti a účinnosti temperační soustavy lze přistoupit k výrobě fyzické vložky. Po výrobě vložky a povrchových úpravách

materiálu je forma připravena na montáž a kompletaci, a dochází k předání zákazníkovi (viz obr. 2.16).

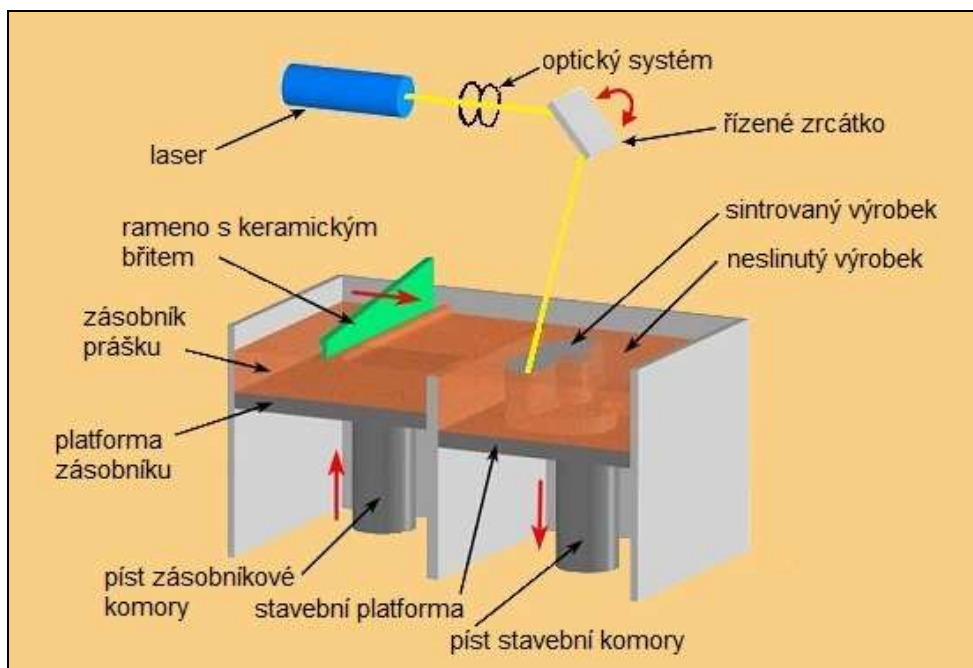


**Obr. 2.16:** *Proces výroby dílu technologií DMLS [29]*

Počítačový model tvarové vložky je "rozřezán" na tenké vrstvy, a informace o těchto vrstvách jsou matematickým popisem předány řídicímu systému stroje (pro ovládání laseru). Principem technologie je spékání kovového prášku laserovým paprskem po definovaných vrstvách (zpravidla o tloušťkách 0,020 – 0,040 mm). Pracovní část stroje je rozdělena na dvě komory, přičemž jedna slouží jako zásobník prášku, v druhé probíhá samotná výroba kovové vložky. Výška dna obou komor je ovládána písty. Další části tohoto systému jsou keramický břit nanášející ze zásobníku potřebnou vrstvu prášku do pracovního prostoru, samotný laser, ze kterého vychází zaostřený paprsek přes optický systém na (v osách X-Y) řízené zrcátko, které usměrňuje laserový paprsek do pracovní komory a vypaluje příslušnou vrstvu podle modelu (viz obr. 2.17) [27, 29].

Postup výroby je následující:

- Píst zásobníku je ve spodní poloze a zásobník je naplněný kovovým práškem. Píst pracovní komory se základovou deskou je v horní poloze.
- Píst zásobníku se vysune o tloušťku jedné vrstvy (a tím "vytlačí" před keramický břit potřebné množství prášku pro jednu vrstvu v pracovní komoře). Píst pracovní komory současně o stejnou tloušťku klesne. Keramický břit rozprostře ze zásobníku kovový prášek do pracovního prostoru a zajistí rovnoměrné nanesení prášku po celé ploše komory v tloušťce jedné spékané vrstvy.
- Laserový paprsek prochází optickým systémem na řízené zrcátko, které jej usměrňuje do pracovní komory na místa, která mají být v oné konkrétní vrstvě spečena.
- Břit se vrátí do základní polohy, píst zásobníku se opět vysune o tloušťku jedné vrstvy, a postup se opakuje.



Obr. 2.17: Princip výroby dílů pomocí DMLS [29]

Kromě výroby celých dílů lze technologií *DMLS* vyrábět i část tvarové vložky na již hotovém polotovaru, nebo touto metodou opravovat poškozené formy.

### 2.3.3 Materiály pro výrobu forem technologií *DMLS*

Výběr materiálů pro výrobu forem a dílů technologií *DMLS* je široký – od lehkých slitin přes oceli až po super-slitiny a kompozity (viz tab. 2.6). Německá firma *EOS GmbH* vyvinula specifické slitiny pro technologií *DMLS* a zároveň optimalizovala standardní průmyslové materiály, jako např. nerezové oceli. První materiál použitelný pro technologií *DMLS* byla bronzová slitina vhodná pro nízko- a středně objemové produkce (*DM 20* - viz tab.). Martenzitická ocel *EOS Maraging Steel MS1* (výchozí prvek vysokopevnostních ocelí v práškové formě) učinila technologií *DMLS* vhodnou k použití ve velkosériové výrobě [26, 30].

Pro stavbu dílů laserovým spékáním používá v ČR společnost *INNOMIA a.s.* materiály *DM 20*, *SS 17-4* a *MS 1*, jejichž podrobnější specifikace a mechanické hodnoty jsou v tab. 2.7.

**Tab. 2.6:** Charakteristika materiálů používaných pro DMLS [30]

Materiál	Charakteristika	Použití
<b>Direct Metal 20 (DM 20)</b>	Prášek na bázi bronzu s dobrými výslednými mechanickými vlastnostmi	Kovové prototypy, malo- a středně sériové formy
<b>Direct Steel 20 (DS 20)</b>	Prášek na bázi oceli, nabízí vysokou pevnost a tvrdost	Vstřikovací formy a funkční prototypy
<b>EOS Stainless steel (EOS SS 17-4)</b>	Korozivzdorná ocel s vysokou korozní odolností a mechanickými vlastnostmi	Kovové prototypy, individualizované a náhradní díly
<b>EOS Maraging Steel (EOS MS 1)</b>	Martenzitická ocel o velmi vysoké pevnosti a tvrdosti	Výroba forem, nástrojů, a velmi zatěžovaných průmyslových součástí
<b>EOS Cobalt Chrome (EOS CC MP1)</b>	Kobalt-chrom-molybdenová slitina s excelentními mechanickými, korozními vlastnostmi a tepelnou odolností	Medicínské aplikace a vysoce tepelně zatěžované součásti (např. letecké motory)
<b>EOS Titanium (EOS Ti 64)</b>	Titanová slitina s excelentními mechanickými vlastnostmi, korozní odolností a biokompatibilitou	V letectví, závodních automobilech a medicínských aplikacích

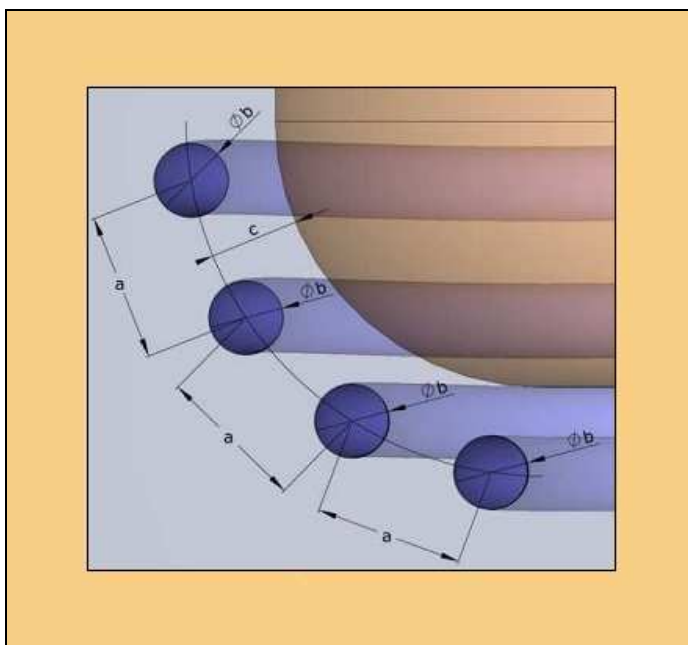
**Tab. 2.7:** Specifikace materiálů používaných společností INNOMIA pro DMLS [31]

	<b>Direct Metal 20 (DM 20)</b>	<b>Stainless Steel (SS 17 - 4)</b>	<b>Maraging Steel (MS 1)</b>
<b>Min. tloušťka stěny</b>	0,6 mm	0,4 mm	0,4 mm
<b>Rychlost stavby</b>	10 – 20 mm <sup>3</sup> /s	2 – 5 mm <sup>3</sup> /s	2 – 4 mm <sup>3</sup> /s
<b>Zbytková porozita</b>	8%	-	-
<b>Mez pevnosti <math>R_m</math></b>	400 MPa	900 MPa	1100 MPa (1950 MPa)
<b>Mez kluzu <math>R_{p0,2}</math></b>	200 MPa	500 MPa	1000 MPa (1950 MPa)
<b>Modul pružnosti</b>	80 GPa	190 GPa	180 GPa
<b>Tvrdost povrchu</b>	120 HV	23 – 33 HRC	36 – 39 HRC (50 – 54 HRC)
<b>Max. pracovní teplota</b>	400°C	550°C	400°C
Pozn: - Zbytková porozita 8% je odstranitelná povrchovou úpravou (tryskáním) - Hodnoty uvedené v závorkách u MS 1 platí pro tepelně zpracovaný materiál			



### 2.3.4 Konstrukční zásady navrhování kanálů konformního chlazení a příklady aplikací

Konstrukční doporučení pro návrh chladících kanálů tvarových vložek zhotovených pomocí metody DMLS jsou stejné jako u návrhů konvenčních kanálů (viz kap. 2.2.1), oboje je založeno na teoriích krystalizace plastů a tepelné vodivosti polymeru i materiálu formy s nezbytnými adaptacemi na systém konformního chlazení na jedné straně a uplatněním výhod DMLS na straně druhé (například možnost změny průřezu kanálů v různých místech jejich trasy). Průměr kanálů by měl být volen v závislosti na vzdálenosti mezi chladícími kanály a dutinou formy. Vhodné rozmístění kanálů je na obr. 2.18, jejich rozměry a poloha umístění v tab. 2.8 [27].



Obr. 2.18 Zásady konstrukce kanálů konformního chlazení [27]

Tab. 2.8 Zásady konstrukce kanálů temperačního chlazení [27]

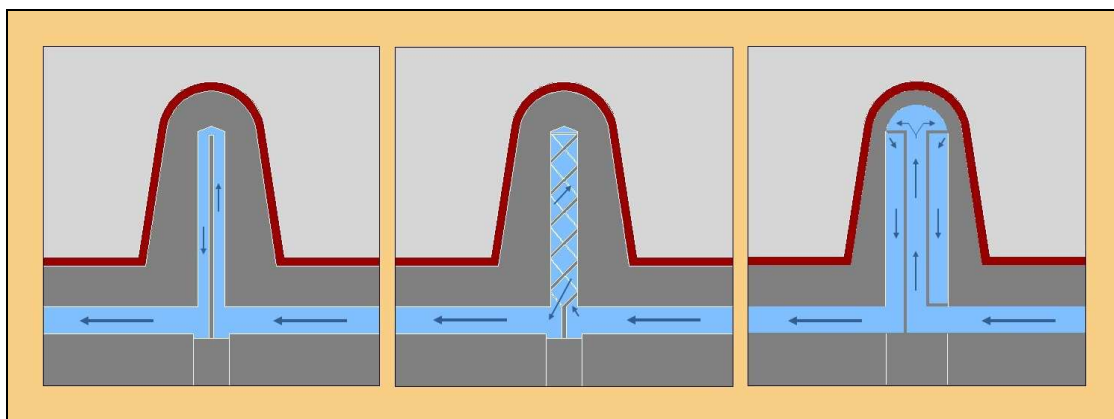
Tloušťka stěny plastového dílu	Průměr kanálu	Vzdálenost středů kanálů	Vzdálenost středů kanálů a povrchu dutiny formy
t [mm]	b [mm]	a [mm]	c [mm]
0 - 2	4 - 8	$(2 - 3) \times b$	$(1,5 - 2) \times b$
2 - 4	8 - 12	$(2 - 3) \times b$	$(1,5 - 2) \times b$
4 - 6	12 - 14	$(2 - 3) \times b$	$(1,5 - 2) \times b$

**Možnosti aplikace dílů** vstřikovaných do forem s konformním chlazením jsou velmi široké, své uplatnění nacházejí zejména v automobilovém průmyslu, zejména jako součásti pro tzv. crash testy, díly pro ověření funkčnosti a smontovatelnosti (závěs kapoty, zámkové systémy) nebo také vysoce zátěžové komponenty v závodních autech. O něco méně důležité je i využití v oblasti luxusních vozů, jako různé tvarově komplikované designové prvky, jako například venkovní obložení středního sloupku (B-sloupku) u Mercedesu Benz CLK, kde byl jako hlavní požadavek hladký a lesklý povrch dílu [12]. Konformní chlazení vedlo k rovnoměrnému odvodu tepla z vstřikovací formy, a snížení vnitřního napětí ve výstřiku. Hlavními důvody pro aplikaci metody DMLS jsou rychlost a ekonomická efektivnost spojená s geometrickou složitostí vyráběných dílů. Další aplikace konformního chlazení je také v obalové technice, kde je požadavek na rychlost produkce. S konformním chlazením se lze setkat i u vyfukování PE lahví [28, 29].



### 3. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce hodnotí aplikaci konformního chlazení u tvarové vložky vstřikovací formy (dlouhého tvárníku), v praxi temperované zpravidla cirkulujícím médiem, které je přiváděno k vrcholu tvárníku vrtaným kanálem z hlavního temperačního kanálu formy systémem ploché nebo spirálové přepážky, či systémem tzv. fontánky (viz obr. 3.1). Nevýhodou systému ploché přepážky je nerovnoměrné rozložení teploty po povrchu tvarové dutiny formy, které je řešeno aplikací spirálové přepážky (konstrukčně omezené rozměrem průměru, který je min. 12 mm, max. 50 mm) nebo fontánkového systému. Hodnocení účinnosti konformního chlazení je provedeno na základě měření teplotních polí v oblasti tvarové vložky ve vstřikovací formě, hodnocením obsahu krystalického podílu ve struktuře polymerního výstřiku a studiem jeho mechanických vlastností při tahovém a ohybovém namáhání ve vztahu k experimentálním výsledkům naměřených při konvenčním způsobu temperace tvárníku z oceli a slitiny mědi systémem ploché přepážky.



**Obr. 3.1:** Možnosti temperace tvarových vložek vstřikovací formy

*vlevo: plochá přepážka, uprostřed: spirálová přepážka, vpravo: fontánkový systém*

Polymerní materiál, technologické parametry stroje, a podmínky zkoušení byly zvoleny tak, aby odpovídaly podmínkám experimentů předchozích diplomových prací provedených na *katedře strojírenské technologie*, zabývajících se možnostmi aplikace tepelné a vírové trubice [21, 22], a poskytovaly tak v budoucnu možnost komplexního srovnání všech experimentů prováděných za stejných podmínek.

Experimentální část diplomové práce je rozdělena na tři hlavní části, kdy první část se zabývá měřením teplotních polí v dutině formy, druhá hodnocením fyzikálně-mechanických vlastností výstřiku a třetí studiem obsahu krystalického podílu ve

struktury materiálu využitím metod *diferenční snímací kalorimetrie a rentgenové difrakce záření X*.

### 3.1. Charakteristika polymerního materiálu

S ohledem na "kompatibilitu" a porovnatelnost experimentů provedených v předchozích diplomových pracích byl pro experimentální měření použit *polypropylen Mosten MT 230*, výrobce *Unipetrol RPA, s.r.o. (dříve CHEMOPETROL, a.s.)*. Jedná se o vysokotekoucí homopolymer s dobrými tokovými vlastnostmi, vhodný pro vstřikování tenkostěnných dílů. Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.1.

**Tab. 3.1:** Materiálové vlastnosti PP Mosten MT 230 [33]

Veličina	Jednotka	Podmínky zkoušení	Typická hodnota	Označení zkušební metody
Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	940	ISO 1183-1
Index toku taveniny	[g/10min]	230 °C/ 2,16 kg	30	ISO 1133
Napětí na mezi kluzu	[MPa]	50 mm/min	38	ISO 527
Poměrné prodloužení při přetržení	[%]	50 mm/min	20	ISO 527
Ohybový modul	[MPa]	1 mm/min	1900	ISO 178
Vrubová houževnatost Charpy	[kJ/m <sup>2</sup> ]	23 °C	2,0	ISO 179-1
Teplota měknutí dle Vicata	[°C]	A50	155	ISO 306

### 3.2. Měření teplotních polí ve formě

Vliv temperačního systému vstřikovací formy na proces nestacionárního sdílení tepla při chlazení výstřiku během procesu vstřikování byl řešen metodou měření časových závislostí teplot na čase ve vybraných místech vstřikovací formy v oblasti tvarové vložky (tvárníku). Experimentální měření bylo provedeno při temperaci tvárníku konformním chlazením a konvenčním systémem vrtaného kanálu s plochou přepážkou při použití tvárníku z oceli a slitiny mědi (*Ampcoloy 940*). Měření bylo

provedeno při třech různých teplotách cirkulujícího média (vody) v temperačních kanálech formy.

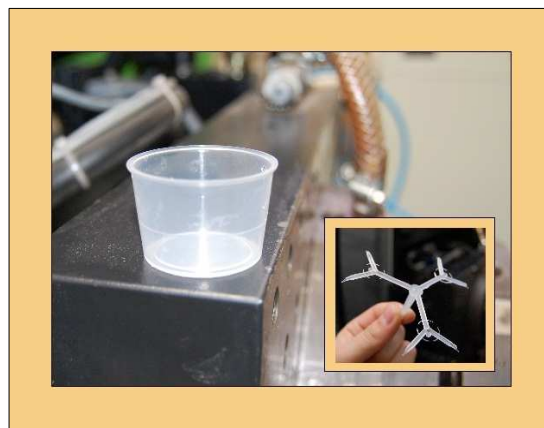
Cílem této části diplomové práce bylo ověřit teoretické předpoklady o rovnoměrnosti a intenzifikaci odvodu tepla z tvarové dutiny vstřikovací formy, resp. z tuhnutí výstřiku, při použití konformního chlazení. Tvarová vložka s konformním chlazením byla zhotovena ve spolupráci s firmou *INNOMIA a.s.* Podrobný popis experimentálního měření, vstřikovacího stroje, nástroje, technologických parametrů a měřící sestavy je uveden v následujících kapitolách.

### 3.2.1. Vstřikovací stroj a konstrukce formy

Experimentální měření teplotního pole na povrchu výstřiku v dutině vstřikovací formy bylo provedeno v dílnách katedry strojírenské technologie na šnekovém, bezsloupkovém hydraulickém vstřikovacím stroji **Engel Victory 80/25** (viz obr. 3.2). Jako nástroj byla použita **šestinásobná vstřikovací forma** pro výrobu kelímků (viz obr. 3.3) o váze 2,9 g (1 ks). Forma je dvoudesková s jednou dělicí rovinou, stírací deskou, zajišťující vyhazování výstřiků, a tvarovými dutinami rozmístěnými do hvězdy vzhledem k hlavnímu kanálu, čímž je zaručeno rovnoměrné plnění všech dutin za stejných podmínek.



Obr. 3.2: Vstřikovací stroj Engel 80/25

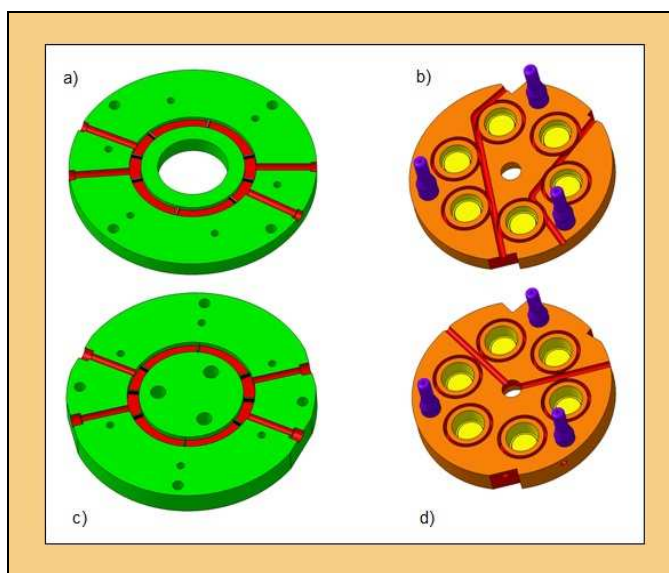


Obr. 3.3: Vstřikovaný kelímek a detail  
vtokové soustavy

Tunelový vtok ústí do dutiny formy pod hranou stírací desky, a je automaticky oddělen při vyhazování z formy. Rám nástroje je kruhový se třemi vodícími sloupky, a přesné dostředění po dosednutí obou částí formy je zajištěno kuželovou dosedací plochou vodících sloupků.

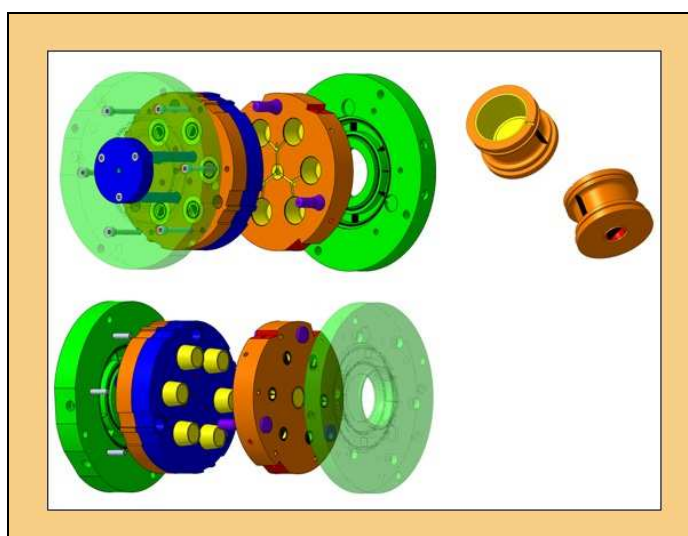
Vstřikovací forma je vybavena temperačním systémem pro cirkulující teplotnosné médium. Temperační systém je rozdělen na tři okruhy pro temperaci tvarových dutin a jeden okruh pro temperaci vtokové vložky (viz obr. 3.4). První okruh (č. 1) je

v upínací desce pevné části formy, kde má na starosti temperaci spodní části tvárnice – tedy temperaci dna výstřiku. Druhý okruh (č. 2a, 2b) temperuje tvarová jádra obtékáním temperačního média okolo tvarových vložek tvárnic, a třetí okruh (č. 3) přivádí temperační médium na spodní část tvarových dutin výrobku – tvárníků a odpovídá způsobu temperování tvárníků s plochou přepážkou, resp. konformnímu chlazení. Konstrukce formy je znázorněná na obr. 3.5.



**Obr. 3.4:** Schéma temperačních okruhů,

- a) okruh 1) pro temperaci spodních částí tvárnice,
- b) okruh 2a) pro temperaci tvarových jader (stěn tvárnice),
- c) okruh 3) pro temperaci dna tvárníků,
- d) okruh 2b) pro temperaci vtokové vložky



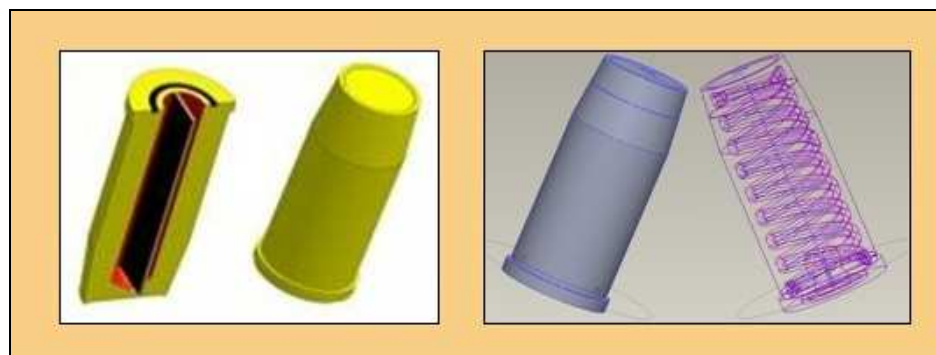
**Obr. 3.5:** Konstrukce vstřikovací formy

nahoře: pohled na pevnou část formy a detail nalisovaných tvárnic,  
dole: pohled na pohyblivou část formy (tvárníky)

Pro experimentální měření teplotní polí byly použity tři tvárníky s různými temperačními systémy, které byly postupně vyměňovány ve vstřikovací formě na shodné pozici (v oblasti měření teplotních polí). První použitý tvárník byl původní z *nástrojové oceli s přepážkovým chlazením*, který byl nahrazen tvárníkem ze *slitiny mědi AMPCOLOY 940 s přepážkovým chlazením*. Třetí tvárník byl z *nástrojové oceli (SS 17-4, viz kap. 2.3.3) zhotovený laserovým spékáním (metodou DMLS) a s konformním chlazením* (viz obr. 3.6 a tab. 3.2). Průměr temperačních kanálů v tvárníku s konformním chlazením je 6 mm, vzdálenost středu kanálů od vnější stěny tvárníku je 6 mm v každém místě tvárníku.

**Tab. 3.2:** Přehled použitých tvárníků

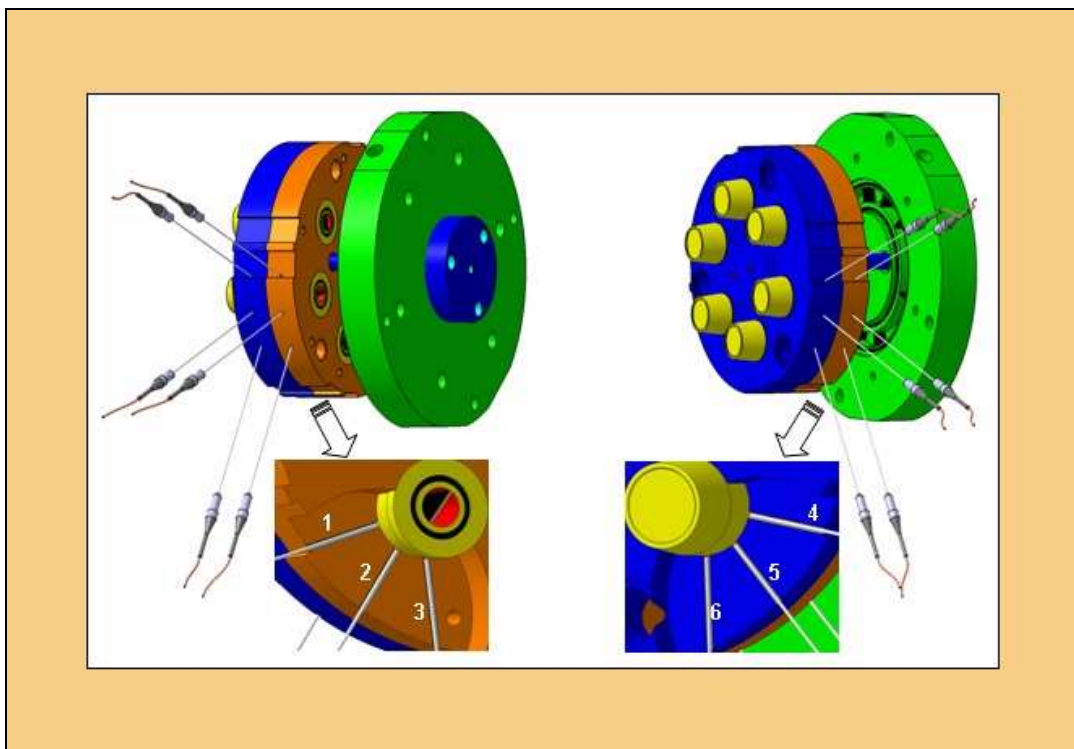
Materiál tvárníku s jejich temperačními systémy, a značení jednotlivých tvárníků v experimentu		
Nástrojová ocel – přepážkové chlazení	AMPCOLOY 940 – přepážkové chlazení	Nástrojová ocel – konformní chlazení



**Obr. 3.6:** vlevo: tvárník s přepážkovým chlazením,  
vpravo: tvárník s konformním chlazením

### 3.2.2. Příprava formy na měření teplotních polí

Měření teplotních polí probíhalo dotykovým způsobem pomocí termočlánků na šesti místech pohyblivé části formy v okolí vybraného tvárníku, který byl postupně vyměňován v závislosti na temperačním systému (viz tab. 3.2). Otvory pro umístění termočlánků byly vyrobeny a rozmístěny tak, aby nedošlo k ovlivnění činnosti a temperace vstřikovací formy. Jejich umístění v oblasti tvarové dutiny formy je zobrazeno na obr. 3.7, a podrobně popsáno v předcházejících pracích, provedených na katedře strojírenské technologie, např. v [22]. Pro měření teploty v dutině formy byly použity **termočláňkové sondy TJ36 typ T** firmy OMEGA s pláštěm z korozi-vzdorné oceli, vhodné pro teploty od -100°C do 370°C.



**Obr. 3.7:** Schéma rozmístění termočlánků v pohyblivé části nástroje

### 3.2.3. Technologické parametry stroje a temperační médium

Nastavené technologické parametry vstřikovacího stroje *Engel Victory 80/25* byly totožné jako u předcházejících prací provedených na *katedře strojírenské technologie* (zejména u [21]) tak, aby byla zaručena vzájemná porovnatelnost pro potřeby katedry, a mohl být postupně tvořen komplexní přehled použitelnosti a aplikace nekonvenčních temperačních systémů.

**Tab. 3.3:** Technologické parametry vstřikování

Technologické parametry				
Teplota taveniny	1. zóna	220 °C	Doba působení vstřikovacího tlaku	2 s
	2. zóna	240 °C	Doba působení dotlaku	5 s
	3. zóna	250 °C	Doba chlazení	25 s
	na trysce	250 °C	Doba odformování	4 s
Vstřikovací rychlost		35 m/min	Ostatní časy	14 s
Mez vstřikovacího tlaku		56,0 MPa	Celková doba cyklu	45 s
Dotlak		43,5 MPa	Uzavírací síla	250 kN



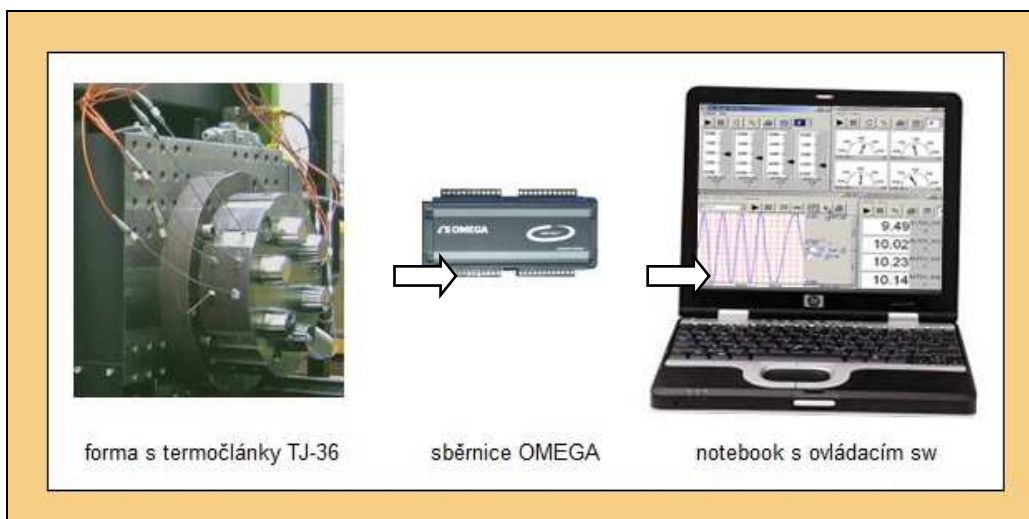
Jako **temperační médium** byla použita cirkulující voda, obsahující inhibitor zabraňující vnitřní korozi a tvorbě vodního kamene na stěnách temperačních kanálů a přípravků pro dispergaci (rozložení) organických a anorganických usazenin. Pro zajištění požadované cirkulace vody byl tlakovými hadicemi připojen temperační agregát TA 3 (viz obr. 3.8) z vybavení dílny *katedry strojírenské technologie*.



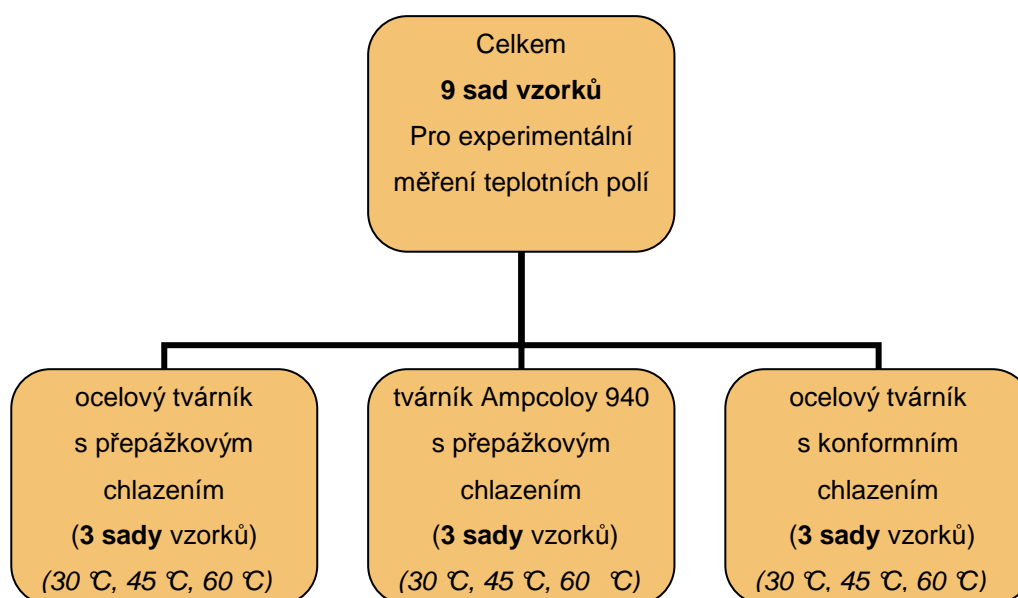
**Obr. 3.8:** Temperační jednotka TA 3

### 3.2.4. Průběh měření teplotních polí v dutině formy

Na vstřikovacím stroji *Engel Victory 80/25* bylo provedeno pomocí *termočlánků TJ-36* experimentální měření teplotních polí v dutině formy při použití různých temperačních systémů. Měřicí sestava (viz obr. 3.9) se dále skládala ze *sběrnice OMEGA*, ke které byly připojeny termočláňkové výstupy, a zpracování dat probíhalo v *ovládacím programu sběrnice DaqView* v osobním počítači. Měření probíhalo postupně v oblasti tvárníku (viz kap. 3.2.1. – tab. 3.2) při třech různých teplotách temperačního média – a to při 30 °C, 45 °C a 60 °C. Celkem bylo provedeno 9 měření teplotních polí. Schéma měření teplotních polí (podle kterého bylo přistupováno i k dalším zkouškám) je na obr. 3.10. Každému měření předcházela kontrola nastavení technologických parametrů stroje a teploty temperačního média (vody). Poté byl spuštěn automatický chod vstřikovacího stroje a záznam měřených hodnot. Hodnoty elektrického napětí z termočlánků byly převáděny sběrnicí *OMEGA* ve stupních Celsia a v sekundových intervalech. Výsledná závislost teploty na čase (viz příloha 1) byla ukládána pro následné vyhodnocení podle použitého temperačního systému a teploty temperačního média. Výstřiky vyrobené na sledovaném tvárníku byly označeny a uchovány pro analýzu jejich struktury (obsahu krystalického podílu ve struktuře polypropylenu) a fyzikálně-mechanických vlastností (viz kap. 3.3 a kap. 3.4.). Získaná data jsou vyhodnocena v kapitole 4.



Obr. 3.9: Schéma měřicí soustavy



Obr. 3.10: Schéma experimentálního měření teplotních polí (značení tvárníků viz kap. 3.2.1.),  
Podle stejného schématu byly připravovány vzorky i pro další zkoušky

### 3.3. Stanovení mechanických vlastností výstřiků

Kinetické podmínky chlazení výstřiků v procesu vstřikování semikrystalických termoplastů jsou významným faktorem, ovlivňující uspořádanost makromolekul na nadmolekulární úrovni, a tím také jejich výsledné mechanické vlastnosti. Z teoretických poznatků lze předvídat, že s rostoucí teplotou formy se zvyšuje obsah krystalického podílu ve struktuře materiálu (tzv. stupeň krystalinity), je však otázkou, jak se tento změní při změně temperačního systému, popřípadě materiálu formy, resp. zda dojde k ovlivnění mechanických vlastností výstřiků.



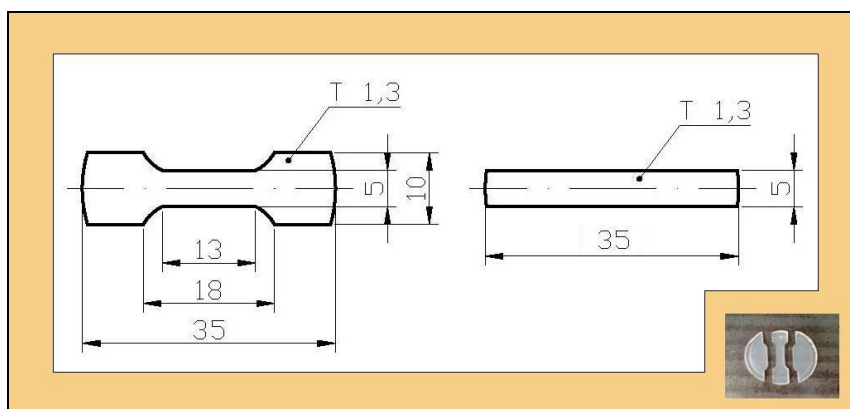
Pro hodnocení vlivu konformního chlazení tvarové vložky vstřikovací formy na mechanické vlastnosti polypropylenových výstřiků bylo použito metod stanovení tahových a ohybových vlastností v souladu s ČSN EN ISO 527 a ČSN EN ISO 178, avšak vzhledem ke geometrii výstřiků v dohodnuté odchylce rozměrů zkušebních těles (viz kap. 3.3.1 a kap. 3.3.2.).

### 3.3.1. Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky pro hodnocení tahových a ohybových vlastností výstřiků byly zhotoveny z jejich rovinného dna na výstředníkovém lisu *LENP 40* střížným nástrojem pro vysekávání zkušebních těles (viz obr 3.11). Tělesa (dna původních vstřikovaných kelímků) byla do nástroje vkládána vždy ve stejné poloze pomocí šablony tak, aby bylo s ohledem na anizotropii vlastností zaručeno vyseknutí vzorku v jednom směru, tedy tak, že při tahovém zatěžování byl vzorek namáhán ve směru toku taveniny a v případě ohybového namáhání ve směru kolmém na směr toku taveniny. Velikost vzorků byla limitována velikostí dna vstřikovaných kelímků ( $\phi 35$  mm) a jejich rozměry jsou uvedeny na obr. 3.12. Před vlastním zkoušením byla zkušební tělesa kondicionována ve standardním prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291.



**Obr. 3.11:** Vlevo: výstředníkový lis *LENP 40*, vpravo: střížný nástroj



**Obr. 3.12:** Vzorky pro zkoušku tahem (vlevo), a ohybem (vpravo), ve výřezu vzorek po vyseknutí ze dna vstřikovaného kelímku

### 3.3.2. Stanovení tahových a ohybových vlastností

Tahové a ohybové vlastnosti byly hodnoceny za podmínek shodných s podmínkami kondicionace zkušebních těles na zkušebním zařízení *Hounsfield H10KT* včetně softwaru *QMAT* a snímací hlavy 500 N (s přesností 0,5 % působící síly v oblasti 2 % až 100 %), viz obr. 3.13.

Při **stanovení tahových vlastností** byla zkušební tělesa protahována ve směru podélné osy konstantní rychlostí 50 mm/min až do okamžiku jejich porušení. Počáteční měřená délka  $L_0 = 14,5$  mm (vzdálenost mezi čelistmi). V průběhu zkoušky byla zaznamenávána síla a jí odpovídající hodnoty prodloužení počáteční měřené délky zkušebního tělesa, resp. grafická závislost smluvního napětí na jmenovitém poměrném prodloužení (viz příloha 2.1). Z uvedené grafické závislosti byly odečteny dle předpisu ČSN EN ISO 527 hodnoty napětí na mezi kluzu v tahu, resp. mez pevnosti v tahu (vzhledem k povaze materiálu jsou tyto meze shodné) a jmenovité poměrné prodloužení na mezi kluzu, které je důležité z hlediska deformačního chování (viz tab. 3.4).

Při **hodnocení ohybových vlastností** výstřiků byla zkušební tělesa volně podepřena dvěma podpěrami vzdálenými 26 mm a uprostřed zatěžována přitlačným trnem konstantní rychlostí 1 mm/min do meze pevnosti v ohybu. Z grafických závislostí napětí na deformaci (viz příloha 2.2) byla stanovena mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu, odpovídající předpisu ČSN EN ISO 178 (viz tab. 3.4).



**Obr. 3.13:** Celkový pohled na uspořádání experimentu (zde u zkoušky ohybem):

uprostřed: trhací zařízení Hounsfield H10KT a připojený počítač se sw QMAT

výřez vlevo: zkouška ohybem, testovací hlava 500 N

výřez vpravo: detail ohýbání zkušebního vzorku

**Tab. 3.4:** Mechanické vlastnosti výstřiků v závislosti na způsobu a podmínkách temperace

<b>Tahové vlastnosti</b> <b>(v závislosti na způsobu a podmínkách temperace)</b>			
<b>Způsob temperace</b>	<b>Podmínky temperace</b>	<b>Napětí na mezi kluzu v tahu <math>\sigma_y</math> [MPa]</b>	<b>Jmenovité poměrné prodloužení na mezi kluzu <math>\varepsilon_y</math> [%]</b>
<b>Konvenční chlazení - ocelový tvárník</b>	30 °C	37,8 ± 0,5	28,7 ± 2,7
	45 °C	39,4 ± 0,4	29,8 ± 1,4
	60 °C	38,6 ± 0,7	25,1 ± 1,2
<b>Konvenční chlazení - tvárník Ampcoloy 940</b>	30 °C	37,5 ± 0,5	30,3 ± 1,3
	45 °C	38,1 ± 0,2	31,6 ± 3,7
	60 °C	38,4 ± 0,4	30,6 ± 1,2
<b>Konformní chlazení - ocelový tvárník</b>	30 °C	38,3 ± 0,5	28,7 ± 2,1
	45 °C	38,2 ± 0,8	35,6 ± 2,3
	60 °C	39,2 ± 0,6	30,4 ± 2,8
<b>Ohybové vlastnosti</b> <b>(v závislosti na způsobu a podmínkách temperace)</b>			
<b>Způsob temperace</b>	<b>Podmínky temperace</b>	<b>Pevnost v ohybu <math>\sigma_{fM}</math> [MPa]</b>	<b>Modul pružnosti v ohybu <math>E_f</math> [%]</b>
<b>Konvenční chlazení - ocelový tvárník</b>	30 °C	58,9 ± 0,7	1687,0 ± 41,1
	45 °C	62,4 ± 1,1	1653,0 ± 107,9
	60 °C	63,1 ± 0,5	1710,0 ± 28,6
<b>Konvenční chlazení - tvárník Ampcoloy 940</b>	30 °C	59,7 ± 0,3	1451,2 ± 82,8
	45 °C	59,6 ± 0,6	1646,2 ± 148,4
	60 °C	57,6 ± 0,4	1321,1 ± 124,2
<b>Konformní chlazení - ocelový tvárník</b>	30 °C	59,3 ± 0,7	1510,0 ± 85,7
	45 °C	61,1 ± 0,8	1461,0 ± 151,9
	60 °C	65,7 ± 0,7	1635,0 ± 95,3

### 3.4. Stanovení krystalického podílu ve struktuře materiálu

Řada fyzikálně-mechanických vlastností polymerů souvisí s jejich molekulární a nadmolekulární strukturou. Nadmolekulární struktura (uspořádání makromolekul ve struktuře polymeru) je přitom ovlivněna nejen chemickými předpoklady a molekulární strukturou plastu, tj. tvarem a délkou makromolekul, ale také kinetickými podmínkami zpracování taveniny ve fázi chladnutí a tuhnutí. Z tohoto důvodu je v experimentální části diplomové práce provedeno zhodnocení způsobu a podmínek temperace na výsledný obsah krystalické fáze ve struktuře polypropyleny, tedy na stupeň krystalinity materiálu.

#### 3.4.1. Diferenční snímací kalorimetrie

Diferenční snímací kalorimetrie (*Differential scanning calorimetry – DSC*) je termická analýza, při které je sledovaný vzorek materiálu podroben lineárnímu ohřevu i chlazení, a přitom se plynule mění rychlost tepelného toku ve vzorku, která je úměrná měrnému teplu. Podstatou zkoušky je sledování kompenzačního tepelného toku během teplotního režimu, který je nezbytný k udržení nulového rozdílu teplot mezi sledovaným materiálem a referenčním vzorkem (u polymerů jde obvykle o vzduch) v závislosti na teplotě, popřípadě času. Z grafické závislosti získaných dat – *DSC termogramu* – lze získat charakteristické teploty polymeru, jako je teplota skelného přechodu, tání, krystalizace, ale také velikost entalpických přeměn při tání polymeru, nebo jeho krystalizaci, apod. Z velikosti entalpie tání zkoumaného vzorku lze při znalosti hodnoty entalpie tání téhož plně krystalického polymeru stanovit dle vztahu 3.1 stupeň krystalinity vzorku  $x_c$ . Na změnu v obsahu krystalického podílu polymeru lze nepřímě usuzovat změnou entalpie tání zkoumaných vzorků. S vyšším stupněm krystalinity se zvyšuje hodnota entalpií tání, tedy energie potřebná k roztavení krystalické struktury v polymeru.

$$x_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^*} \cdot 100[\%] \quad (3.1)$$

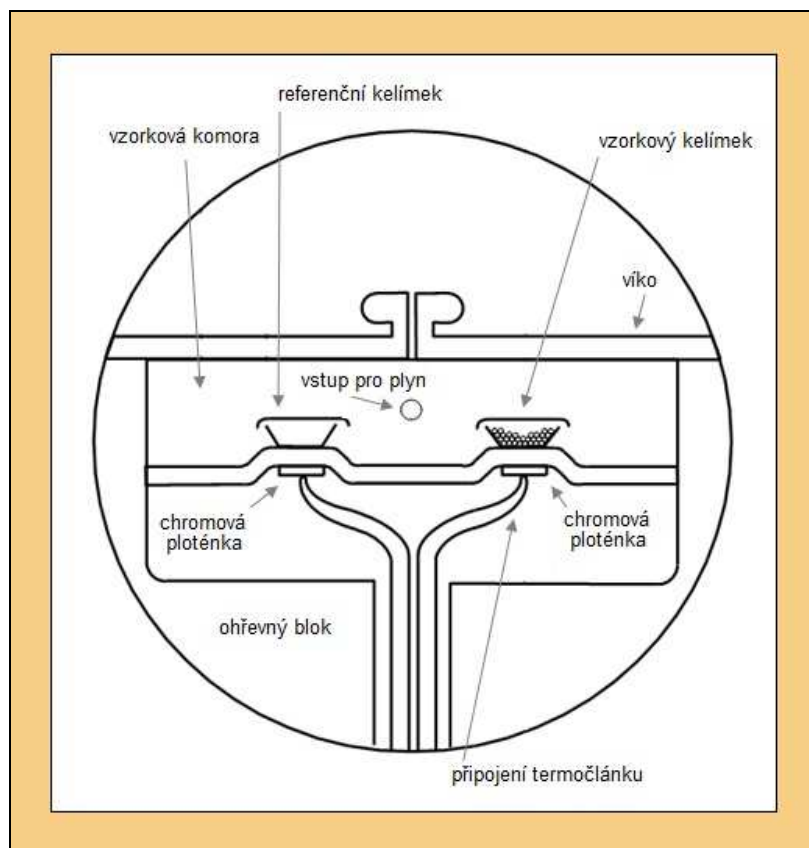
kde je:

$\Delta H_m$  - entalpie tání zkoumaného polymeru [J/g]

$\Delta H_m^*$  - entalpie tání plně krystalického polymeru [J/g]

### Příprava vzorků a přístroje

Vzorky pro DSC analýzu byly odebrány (pomocí rotačního mikrotomu) z oblasti dna výstřiků, rozříděných v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy (viz kap. 3.2.4 – obr. 3.10). Hmotnost vzorků byla ca. 11 mg (s ohledem na skutečnost, že výsledky měření jsou ovlivněny hmotností vzorku, byla dodržována zásada shodnosti ve velikosti navážky vzorků). Zkušební vzorek byl zalisován do hliníkového kelímku s víčkem (s ohledem na minimalizaci tepelného spádu a tepelné kapacity) a společně s referenčním vzorkem (prázdný hliníkový kelímek) vložen do měřících cel kalorimetru (viz obr. 3.14).



Obr. 3.14: Detail měřících cel kalorimetru

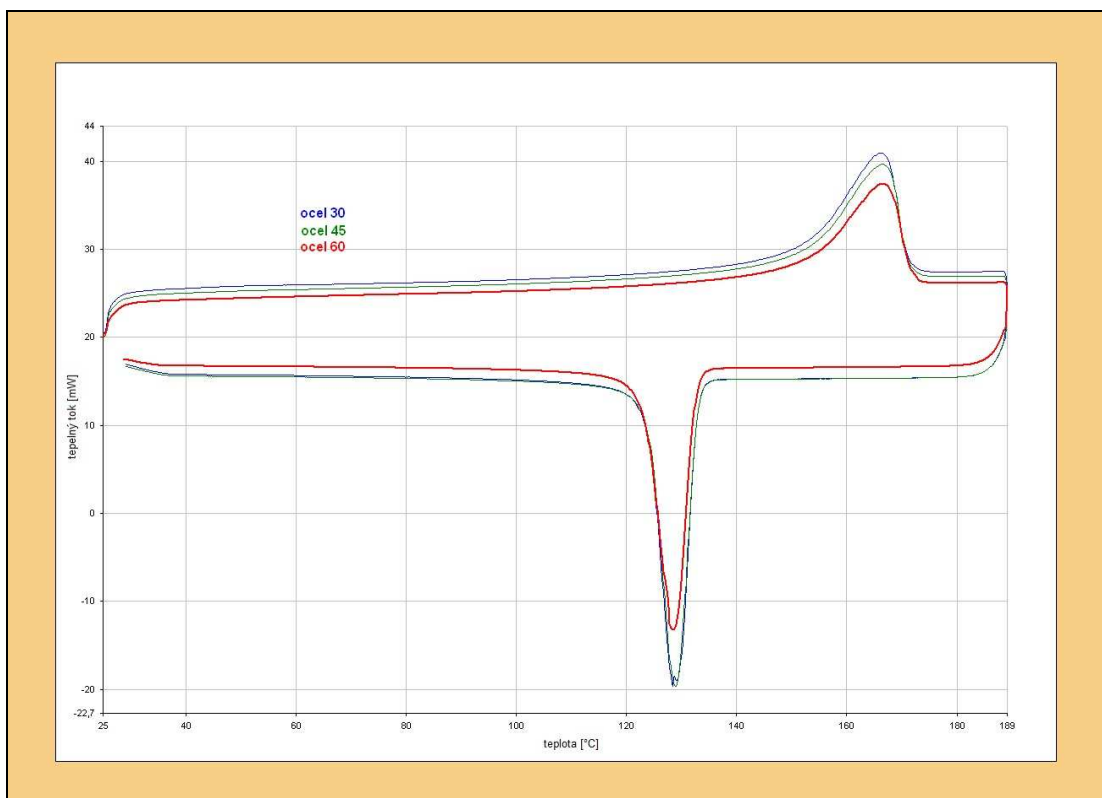
### Průběh zkoušky

Experimentální měření bylo provedeno na přístroji *DSC 6 Perkin Elmer*, který byl opatřen *intracoolerem Minichiller CC* (chladičem) pro režim chlazení zkoumaných vzorků. Zkušební a referenční vzorek byly vyhřívány a následně po dosažení teplotního maxima nastaveného teplotního režimu (viz tab. 3.5) chlazeny stejnou rychlostí takovým způsobem, aby mezi nimi nebyl žádný teplotní rozdíl. S ohledem na zamezení oxidativní degradace vzorku bylo měření provedeno v inertní atmosféře dusíku, která navíc zajistí odvod plyných produktů, které mohou vznikat při zahřívání

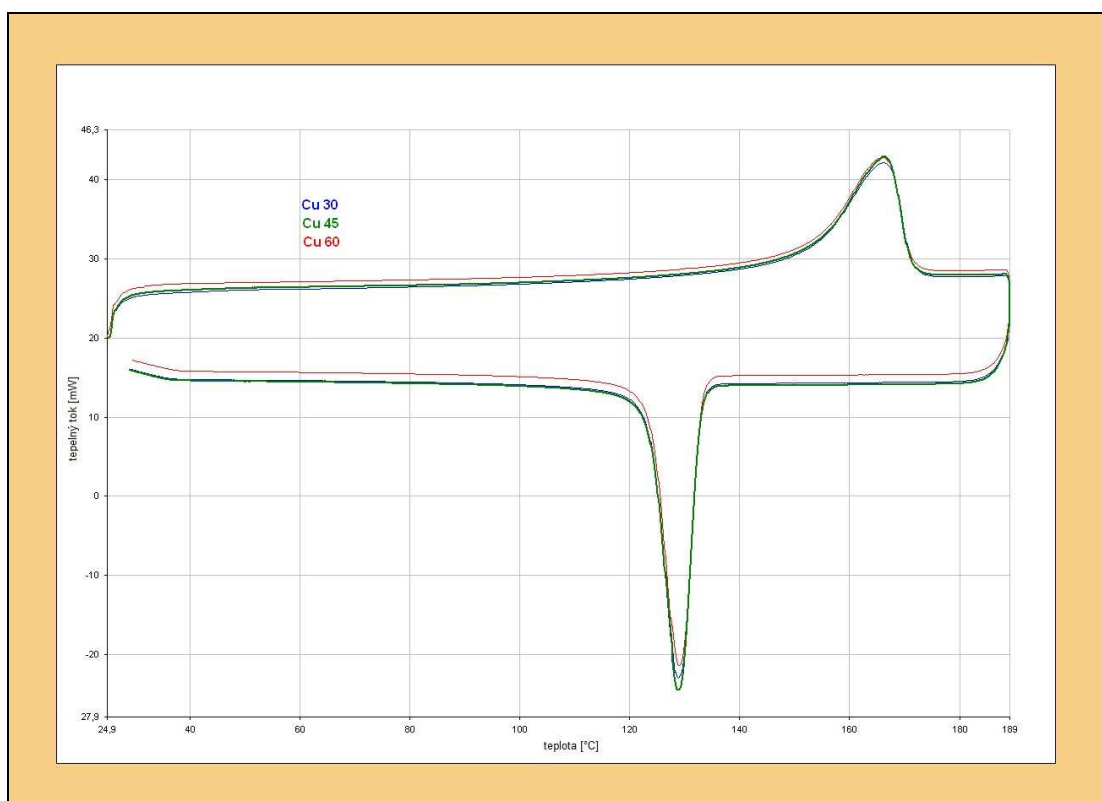
vzorků a ovlivnit průběh měření. Množství tepla, které bylo potřebné k udržení izotermních podmínek mezi vzorky, bylo sledováno v závislosti na teplotě a graficky znázorněno v závislosti na způsobu a podmínkách temperace polypropylenů na obr. 3.15 až obr. 3.17. Ze záznamu DSC analýzy (viz příloha 4), kde jsou zřejmé endotermní a exotermní procesy, při nichž došlo ke zvýšení, resp. ke snížení tepelné kapacity sledovaného vzorku, bylo možné stanovit teplotu tání ( $T_m$ ), teplotu krystalizace ( $T_c$ ), entalpii tání ( $\Delta H_m$ ) a entalpii krystalizace ( $\Delta H_c$ ), viz tab. 3.6.

**Tab. 3.5:** Podmínky zkoušek DSC analýzy

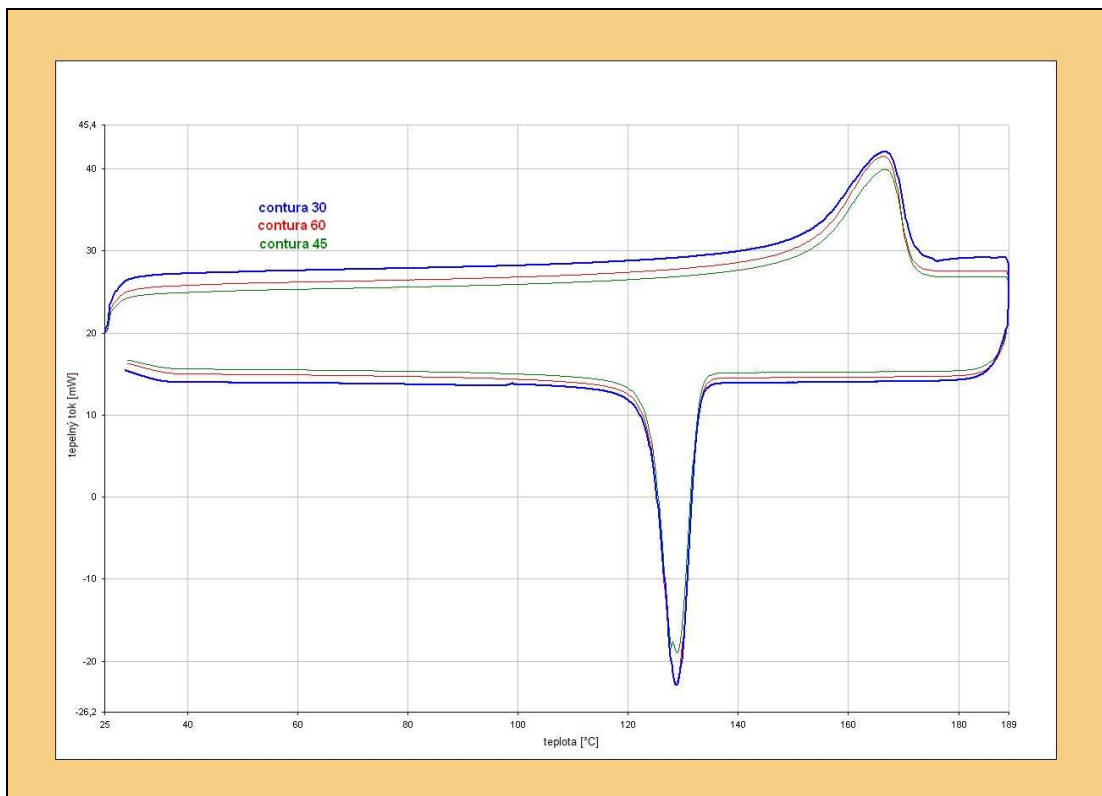
Podmínky zkoušek DSC analýzy									
Počáteční izoterma				teplota 25 °C, čas 1 min					
Režim ohřevu				25 °C až 190 °C					
Rychlost ohřevu				10 °C/min					
Režim chlazení				190 °C až 25 °C					
Rychlost chlazení				10 °C/min					
Hmotnost vzorků [mg]									
(v závislosti na způsobu a podmínkách temperace)									
Konvenční chlazení - ocelový tvárník			Konvenční chlazení - tvárník Ampcoloy 940			Konformní chlazení - ocelový tvárník			
30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C	°C
10,90	10,75	11,10	11,20	10,90	11,10	10,80	10,90	10,90	



**Obr. 3.15:** DSC termogram pro ocelový tvárník s konvenčním chlazením



**Obr. 3.16:** DSC termogram pro tvárník ze slitiny Ampcoloy 940 s konvenčním chlazením



**Obr. 3.17:** DSC termogram pro ocelový tvárník s konformním chlazením

**Tab. 3.6:** Výsledky DSC analýzy

Výsledky DSC analýzy zkušebních vzorků (v závislosti na způsobu a podmínkách temperace)									
Veličina	Konvenční chlazení - ocelový tvárník			Konvenční chlazení - tvárník Ampcoloy 940			Konformní chlazení - ocelový tvárník		
	30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C
$T_m$ [°C]	166,2	166,6	166,6	166,2	166,2	166,1	166,7	166,6	166,4
$T_c$ [°C]	128,4	128,9	128,5	128,9	128,8	129,1	128,8	128,9	128,8
$\Delta H_m$ [J/g]	82,1	80,2	74,5	92,8	91,2	88,2	90,7	82,9	95,8
$\Delta H_c$ [J/g]	116,5	115,1	99,7	125,5	126,0	123,4	120,8	117,3	126,8



### 3.4.2. Rentgenová difrakce záření X

Z měření difrakce rentgenových paprsků lze rovněž získat informace o dokonalosti krystalické struktury polymerů. *Rentgenová difrakce záření X (X-ray diffraction)* je základní metodou studia uspořádanosti v polymerních systémech, která umožňuje získat informace nejen o obsahu krystalického podílu ve struktuře, ale i o uložení atomů v základní krystalické buňce a jejích rozměrech, hustotě krystalické fáze, velikosti krystalitů a stupni orientace polymerů (z difrakce záření v oblasti velkých úhlů, tzv. *širokoúhlé difrakce WAXS*), a také o rozměrech krystalických lamel a vzdálenostech krystalitů (z *malouhlové difrakce SAXS*) [34].

Pro hodnocení reflexí polykrystalických látek je třeba použít monochromatického záření. U polymerů se pracuje prakticky pouze se *zářením Cu K $\alpha$* , které má vhodnou vlnovou délku pro difrakční studie ( $\lambda=0,154$  nm) [35]. Při interakci s hmotou je *záření X* absorbováno a rozptylováno do různých směrů elasticky bez změny vlnové délky, a neelasticky – se změnou vlnové délky. Interakce *paprsků X* s materiálem, kdy zůstává vlnová délka rozptýleného záření nezměněna (*koherentní rozptyl*), se využívá pro strukturní studium.

S ohledem na zadání diplomové práce je využití metody *rentgenové difrakce záření X* omezeno na stanovení obsahu krystalického podílu ve vzorcích polypropylenů v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy.

Dlouhé řetězce polypropylenů jsou schopné krystalizovat v reálných podmínkách pouze do určitého stupně. Odrazem tohoto strukturního jevu je *difraktogram polypropylenů*, skládající se ze dvou složek. Řada ostrých reflexí odpovídá difrakci na krystalické fázi, zatímco široké, velmi difúzní amorfnní halo (viz obr. 3.18), je dáno rozptylem na nekystalické fázi. Stanovení stupně krystalinity vychází z předpokladu, že *intenzita rozptylu paprsků X* na jednotce hmoty vzorku je táž u krystalické i amorfnní fáze [35]. Vzhledem k rozdílnému charakteru rozptylu na těchto fázích je možno obě složky rozptylu oddělit. Stanovením integrální intenzity rozptylu na krystalické ( $I_k$ ) a amorfnní ( $I_a$ ) složce lze stanovit dle vztahu (3.2) stupeň krystalinity:

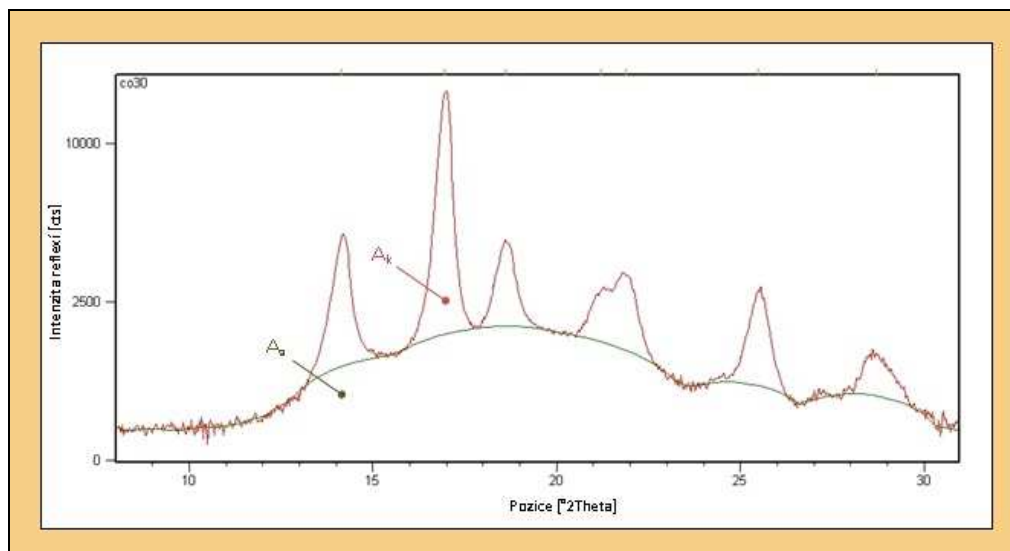
$$x_C = \frac{I_K}{I_A} \cdot 100 = \frac{A_K}{A_K + A_A} \cdot 100 [\%] \quad (3.2)$$

kde je:

- $I_K$  integrální intenzita krystalické fáze měřena od křivky vymezující amorfni halo [cts]
- $I_A$  integrální intenzita amorfni halo [cts]
- $A_K$  plocha krystalické fáze nad amorfni halo [cts x °2Theta]
- $A_A$  plocha amorfni halo [cts x °2Theta]

### Průběh zkoušky

Experimentální měření radiálního rozložení intenzity *rozptýleného záření X* jako funkce úhlu pro jednotlivé výstřiky polypropyleny v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy bylo provedeno ve spolupráci s *Ústavem inženýrství polymerů při Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně*. Měření bylo provedeno na výstřiku v místě jeho dna a na přístroji *PANalytical X'Pert PRO* s *goniometrem theta-theta*, zářením  $\text{Cu } K_{\alpha}$  o vlnové délce 0,1541 nm a *polovodičovým detektorem PIXcel* (viz obr. 3.19). Nastavení clon bylo v hodnotách 5 ° až 35 ° (2Theta) a krokem 0,0263 °. Doba snímání při každém kroku činila 37,74 s.



**Obr. 3.18:** Difraktogram polypropylenového výstřiku  
(konformní chlazení, teplota temperačního média 30 °C)

Radiální rozložení intenzit *rozptýleného záření X* jako funkce úhlu (*difraktogramy*) jsou pro jednotlivé polypropylenové výstřiky v závislosti na způsobu a podmínkách temperace uvedeny v příloze 5, přičemž nejvyšší intenzity reflexí se pohybovaly na pozici 17 ° 2Theta. Vyhodnocení píku spekter (přesná pozice, intenzita, plocha) je pro

každý tento vzorek uvedeno přehledně v tab. 3.7 až tab. 3.9. Stanovení krystalického podílu ve výstřiku v souladu se vztahem (3.2) bylo provedeno pomocí softwaru *PANalytical X'Pert*, a výsledky pro jednotlivé polypropylenové vzorky jsou uvedeny v tab. 3.10.

**Tab. 3.7:** Vyhodnocení rentgenové difrakce záření X

Vyhodnocení píku spekter – pro konvenční chlazení ocelového tvárníku				
Teplota formy [°C]	Pík	Pozice píku [°Theta]	$I_k$ [cts]	$A_k$ [cts*2Theta]
30	1	14,0506	4470,37	1864,85
	2	16,8365	11909,60	4225,20
	3	18,5141	3232,23	1284,26
	4	21,1418	2106,70	953,72
	5	21,8168	2946,83	1284,83
	6	25,3938	2242,32	1028,57
	7	28,5707	720,99	413,57
45	1	14,1270	4342,29	1913,16
	2	16,9050	11677,36	4071,92
	3	18,5940	2966,72	1239,65
	4	21,1668	1694,50	666,92
	5	21,8529	2629,04	1268,04
	6	25,4569	2275,48	1004,02
	7	28,6547	700,14	425,17
60	1	14,1341	4378,53	1824,39
	2	16,9177	12008,03	4123,93
	3	18,6098	3056,17	1251,99
	4	21,1828	1893,11	780,68
	5	21,8756	2919,27	1326,53
	6	25,4700	2304,88	997,70
	7	28,6997	761,98	488,95

**Tab. 3.8:** Vyhodnocení rentgenové difrakce záření X

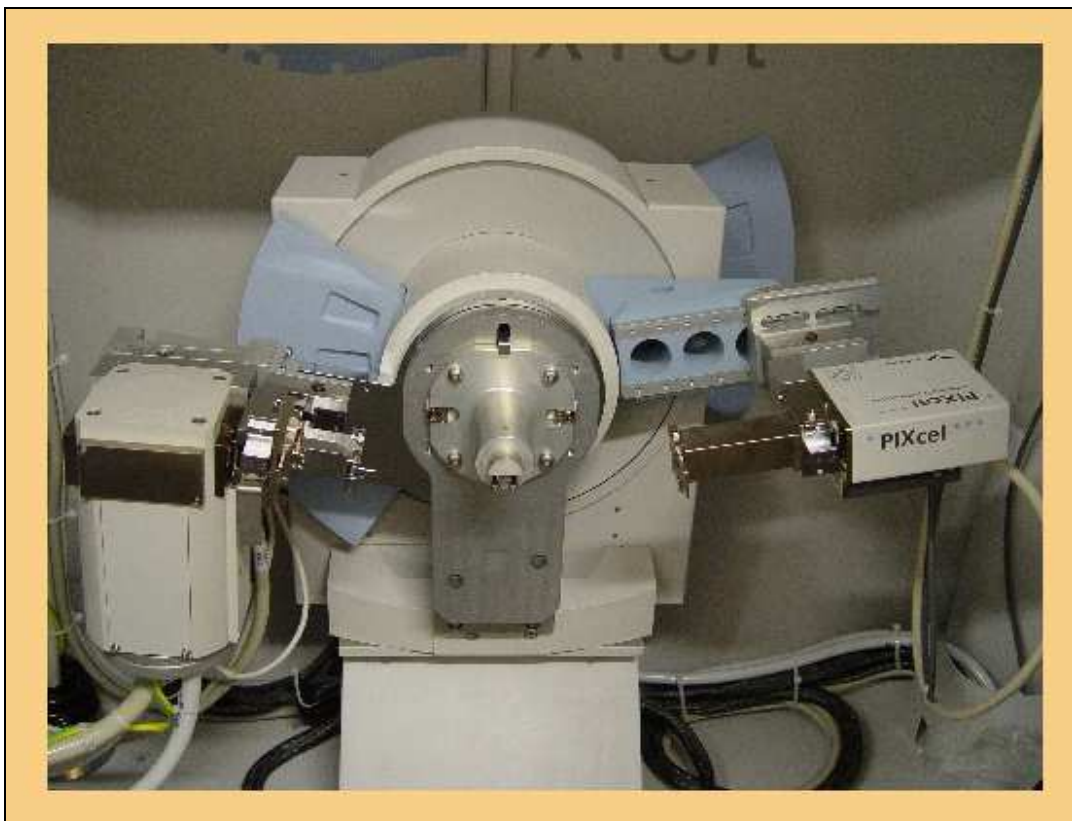
Vyhodnocení píku spekter – pro konvenční chlazení tvárníku ze slitiny Ampcoloy 940				
Teplota formy [°C]	Pík	Pozice píku [°Theta]	$I_k$ [cts]	$A_k$ [cts*2Theta]
<b>30</b>	1	14,1611	4116,16	1808,05
	2	16,9496	12485,70	4491,97
	3	18,6239	2918,46	1249,77
	4	21,1828	1540,45	588,85
	5	21,8759	2255,60	1081,83
	6	25,5018	2380,49	1053,59
	7	28,6681	751,60	515,92
<b>45</b>	1	14,1362	4076,32	1728,32
	2	16,9291	12720,23	4438,64
	3	18,6053	3073,95	1268,29
	4	21,1875	1655,17	669,84
	5	21,8661	2446,82	1149,94
	6	25,4848	2435,73	1053,83
	7	28,6781	754,58	482,56
<b>60</b>	1	14,1548	4002,63	1729,25
	2	16,9420	13320,89	4599,91
	3	18,6256	2986,82	1199,21
	4	21,2110	1452,99	534,25
	5	21,8791	2220,63	1051,50
	6	25,4936	2521,94	1085,96
	7	28,6890	746,85	469,58

**Tab: 3.9:** Vyhodnocení rentgenové difrakce záření X

Vyhodnocení píku spekter – pro konformní chlazení ocelového tvárníku				
Teplota formy [°C]	Pík	Pozice píku [°Theta]	$I_k$ [cts]	$A_k$ [cts*2Theta]
<b>30</b>	1	14,1488	4184,18	1775,29
	2	16,9382	12179,39	4328,29
	3	18,6042	3023,83	1300,25
	4	21,1918	1476,55	639,99
	5	21,8755	2262,47	1005,60
	6	25,4896	2374,90	1044,92
	7	28,6907	678,79	420,38
<b>45</b>	1	14,1379	4495,33	1924,66
	2	16,9215	11827,51	4175,80
	3	18,6010	3064,38	1285,44
	4	21,1636	1792,03	656,01
	5	21,8535	2813,67	1356,72
	6	25,4727	2239,32	990,98
	7	28,6679	777,55	514,08
<b>60</b>	1	14,1542	4395,28	1875,16
	2	16,9430	13662,72	4680,31
	3	18,6224	3144,24	1295,27
	4	21,1739	1375,33	517,18
	5	21,8732	2258,57	1107,52
	6	25,4947	2536,83	1094,88
	7	28,7181	748,08	434,37

**Tab. 3.10:** Vypočtené hodnoty stupně krystalinity  $x_c$

Stanovení krystalického podílu ve výstřiku (v závislosti na způsobu a podmínkách temperace)		
Teplota formy [°C]	Způsob temperace tvárníku	Stupeň krystalinity [%]
30	Konvenční chlazení, ocel	45,7
	Konvenční chlazení, Ampcoloy 940	46,0
	Konformní chlazení, ocel	46,8
45	Konvenční chlazení, ocel	47,8
	Konvenční chlazení, Ampcoloy 940	47,3
	Konformní chlazení, ocel	46,6
60	Konvenční chlazení, ocel	47,8
	Konvenční chlazení, Ampcoloy 940	47,7
	Konformní chlazení, ocel	48,0



**Obr. 3.19:** přístroj PANalytical X'Pert PRO

## 4. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

Stejně jako experimentální část je tato kapitola rozdělena do třech částí podle povahy experimentálního měření. První část hodnotí experimentální měření teplotních polí v okolí dutiny formy v závislosti na způsobu a podmínkách temperace formy, druhá část se věnuje výsledkům zkoušek mechanických vlastností provedených na zkušebních vzorcích odebraných z vystříknutých dílů a v třetí části je zhodnocen vliv použitého temperačního systému a teploty cirkulujícího temperačního média na obsah krystalického podílu ve struktuře materiálu. Celkem bylo v každé zkoušce hodnoceno devět sad zkušebních vzorků v závislosti na použitém způsobu a podmínkách temperace vstřikovacích forem – tedy teploty cirkulujícího média, která byla nastavována postupně na 30 °C, 45 °C a 60 °C (viz tab. 4.1).

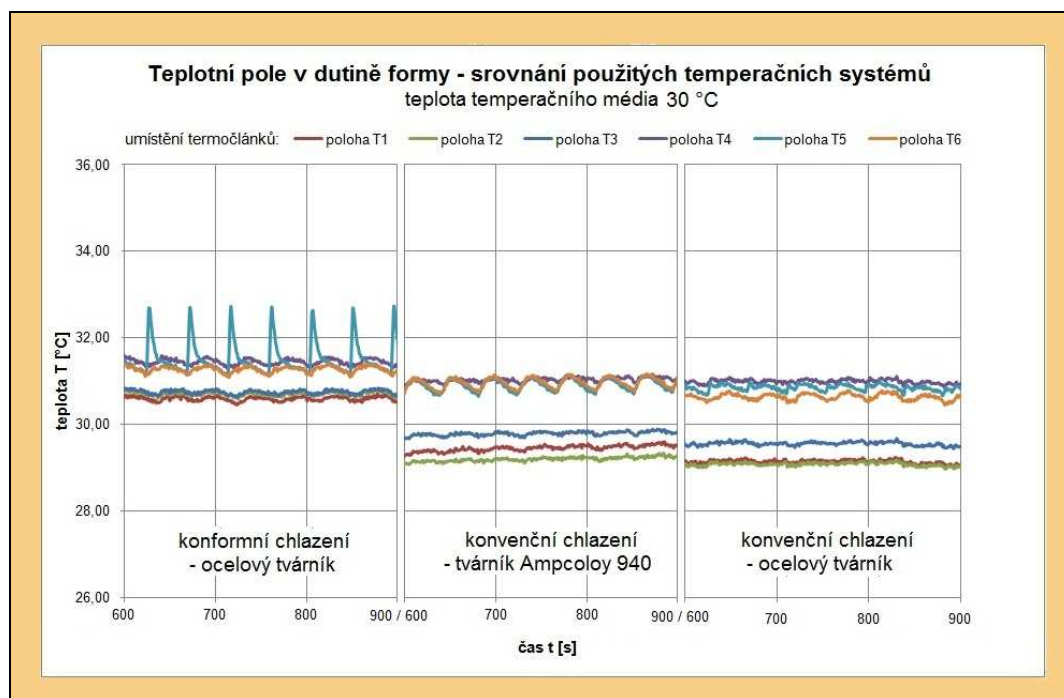
**Tab. 4.1:** Schéma hodnocení zkušebních vzorků

Schéma hodnocení zkušebních vzorků		
Celkem 9 sad vzorků		
Konvenční chlazení - ocelový tvárník <b>3 sady</b> vzorků <i>(dle teploty temperačního média 30 °C, 45 °C a 60 °C)</i>	Konvenční chlazení - tvárník Ampcoloy 940 <b>3 sady</b> vzorků <i>(dle teploty temperačního média 30 °C, 45 °C a 60 °C)</i>	Konformní chlazení - ocelový tvárník <b>3 sady</b> vzorků <i>(dle teploty temperačního média 30 °C, 45 °C a 60 °C)</i>

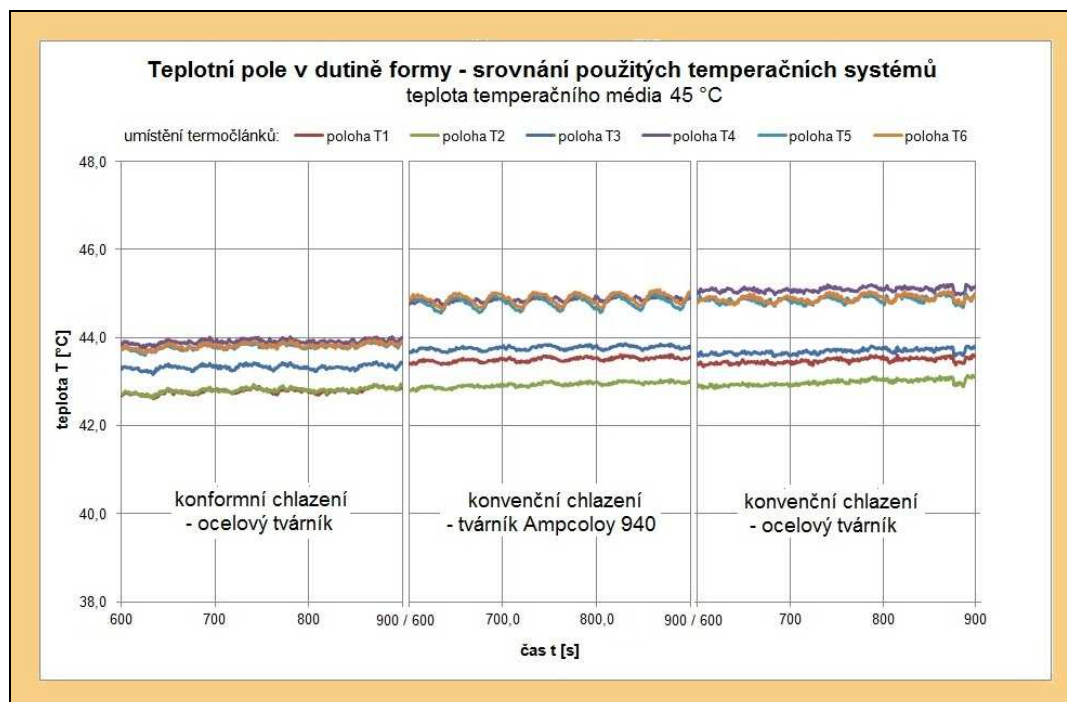
### 4.1. Vyhodnocení experimentálního měření teplotních polí

Při měření teplotních polí v okolí dutiny formy byl hodnocen rozdíl teplot snímaných termočlánky v jednotlivých oblastech dutiny formy s cílem porovnat jednotlivé temperační systémy z hlediska intenzity a rovnoměrnosti odvodu tepla z dutiny formy. Získaná data z provedených měření v grafické závislosti teploty na čase jsou v příloze 1. Grafické srovnání naměřených hodnot z hlediska použitého temperačního systému je na obr. 4.1 až obr. 4.3, v čase 600 s, resp. v rozmezí 600 s až 900 s po zahájení měření teplot ve vybraných místech vstřikovací formy, tj. v časovém úseku ustáleného teplotního pole ve vstřikovací formě. Intenzifikaci odvodu tepla z tvarové části vstřikovací formy lze obtížně hodnotit (viz obr. 4.1 až obr. 4.3), neboť teplotní rozdíly v závislosti na způsobu temperace formy jsou malé a jsou ovlivněny do značné míry přípravou experimentálního měření, resp. výměnou tvarových vložek a prodlevou v jejich ohřevu na temperační teplotu, apod. Rovněž velikost výstřiku, resp. tvárníku není z hlediska posuzování vhodnosti konformního chlazení k intenzivnímu odvodu tepla optimální. Je zřejmé, že u tvarových částí, které lze konvenčním

způsobem temperace chladit jen obtížně, by efekt konformního chlazení ve vztahu k odvodu tepla z formy byl více reprodukovatelný. Z uvedených grafických závislostí a z hodnot uvedených v tab. 4.2 až tab. 4.4 lze však jednoznačně říci, že konformní systém chlazení tvárníku, zajistil rovnoměrný odvod tepla z tvarové části vstřikovací formy, obdobně jako použití vysoce tepelně vodivého materiálu Ampcoloy 940 ke konstrukci tvárníku.

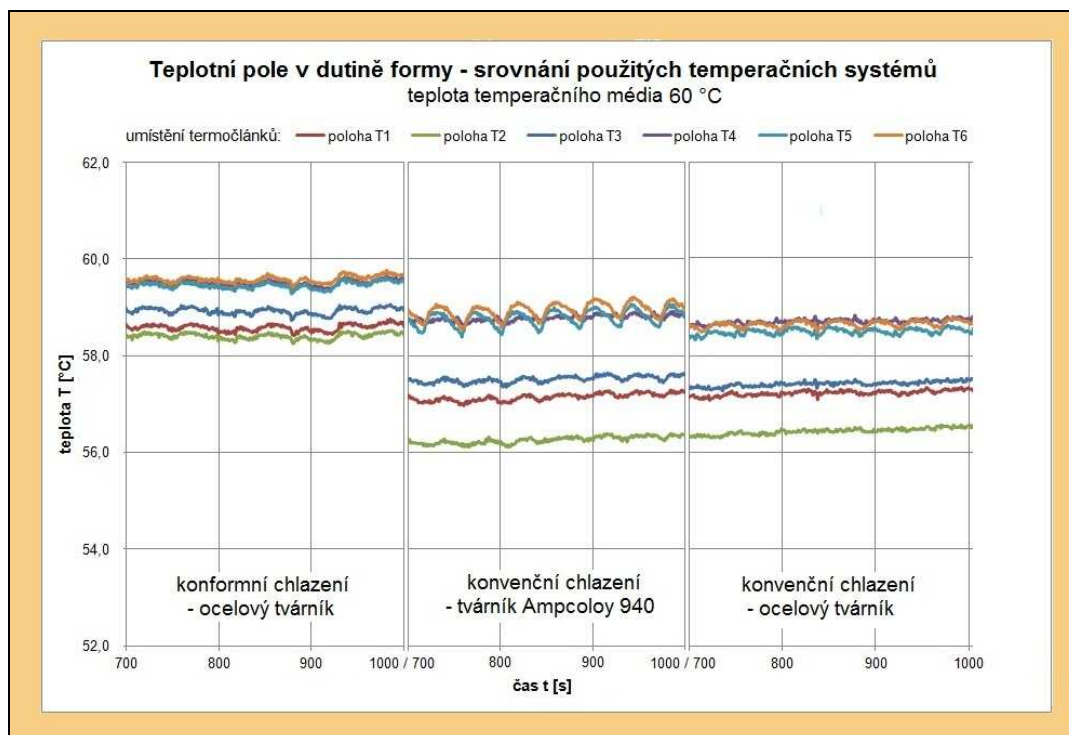


**Obr. 4.1:** Porovnání použitých temperačních systémů při teplotě temperačního média 30 °C



**Obr. 4.2:** Porovnání použitých temperačních systémů při teplotě temperačního média 45 °C





**Obr. 4.3:** Porovnání použitých temperačních systémů při teplotě temperačního média 60 °C

**Tab. 4.2:** Vyhodnocení teplot v dutině formy při teplotě temperačního média 30 °C

Vyhodnocení experimentálního měření teplotních polí			
Použitý temperační systém	Konvenční chlazení - ocelový tvárník	Konvenční chlazení - Ampcoloy 940	Konformní chlazení - ocelový tvárník
Teplota temperačního média	30 °C	30 °C	30 °C
Min. / max. naměřená teplota (v celé oblasti dutiny formy)	29,2 °C / 31,0 °C	29,7 °C / 31,2 °C	30,5 °C / 31,6 °C
Rozdíl teplot (v celé oblasti dutiny formy)	1,8 °C	1,5 °C	1,1 °C

**Tab. 4.3:** Vyhodnocení teplot v dutině formy při teplotě temperačního média 45 °C

Vyhodnocení experimentálního měření teplotních polí			
Použitý temperační systém	Konvenční chlazení - ocelový tvárník	Konvenční chlazení - Ampcoloy 940	Konformní chlazení - ocelový tvárník
Teplota temperačního média	45 °C	45 °C	45 °C
Min. / max. naměřená teplota (v celé oblasti dutiny formy)	42,8 °C / 45,3 °C	42,7 °C / 45,4 °C	42,6 °C / 44,1 °C
Rozdíl teplot (v celé oblasti dutiny formy)	2,5 °C	2,7 °C	1,5 °C

**Tab. 4.4:** Vyhodnocení teplot v dutině formy při teplotě temperačního média 60 °C

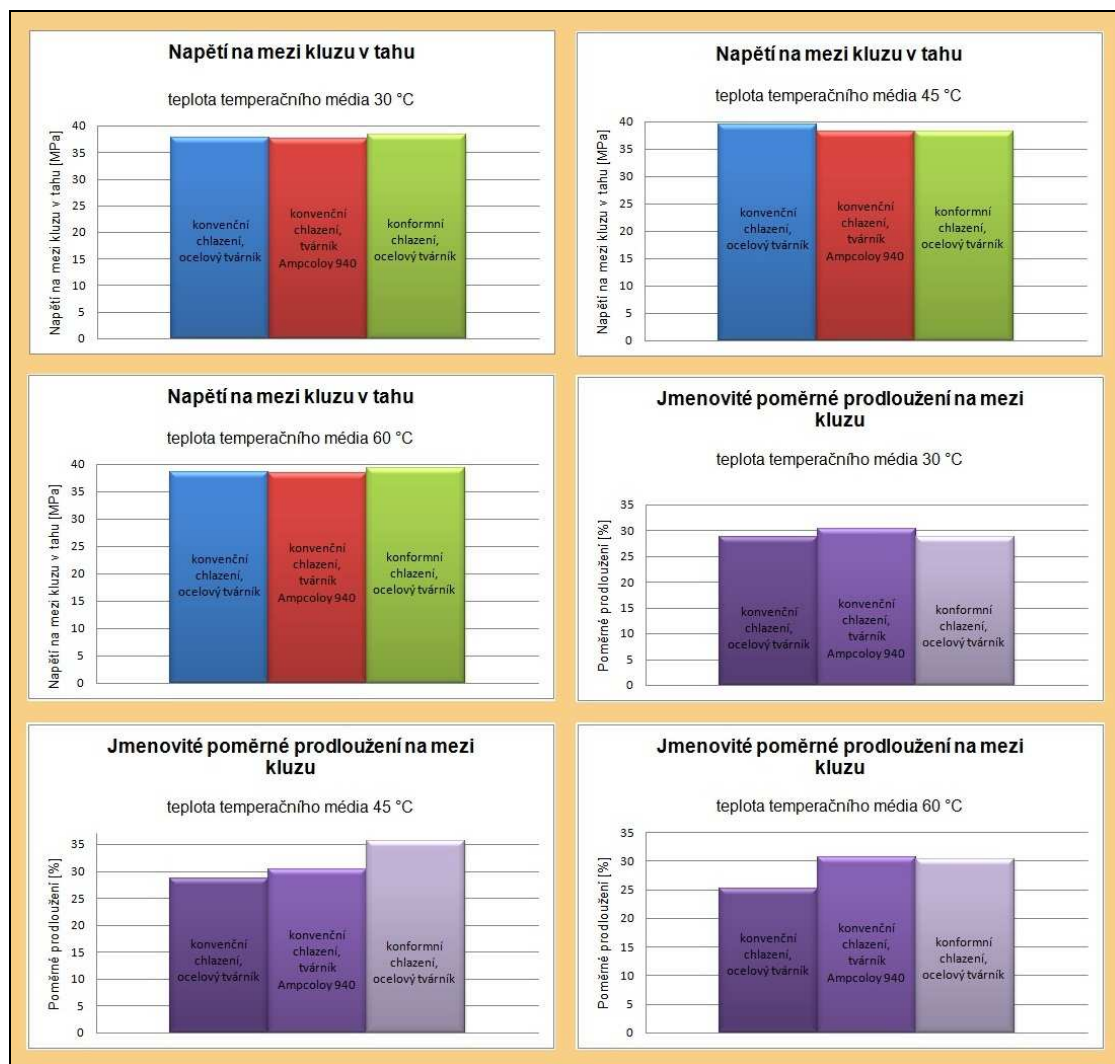
Vyhodnocení experimentálního měření teplotních polí			
Použitý temperační systém	Konvenční chlazení - ocelový tvárník	Konvenční chlazení - Ampcoloy 940	Konformní chlazení - ocelový tvárník
Teplota temperačního média	60 °C	60 °C	60 °C
Min. / max. naměřená teplota (v celé oblasti dutiny formy)	56,4 °C / 58,9 °C	56,2 °C / 59,2 °C	58,2 °C / 59,8 °C
Rozdíl teplot (v celé oblasti dutiny formy)	2,5 °C	3,0 °C	1,5 °C

## 4.2. Vyhodnocení výsledků zkoušek mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků byly hodnoceny dle schématu v tab. 4.1 v závislosti na způsobu a podmínkách temperace formy, při kterých byly vyráběny výstřiky, z nichž byly tyto vzorky odebrány. Stanovením tahových vlastností byly zjištěny hodnoty napětí na mezi kluzu v tahu  $\sigma_y$ , jež vzhledem k povaze materiálu odpovídá mezi pevnosti v tahu  $\sigma_M$ , a jmenovité poměrné prodloužení na mezi kluzu  $\varepsilon_y$ , tedy jmenovité poměrné prodloužení odpovídající napětí na mezi kluzu. Stanovením ohybových vlastností byly zjištěny hodnoty pevnosti v ohybu a modulu

pružnosti v ohybu. Naměřené hodnoty mechanických vlastností jsou přehledně zpracované v tab. 3.4, grafické vyhodnocení tahových vlastností je na obr. 4.4, vyhodnocení ohybových vlastností je na obr. 4.5.

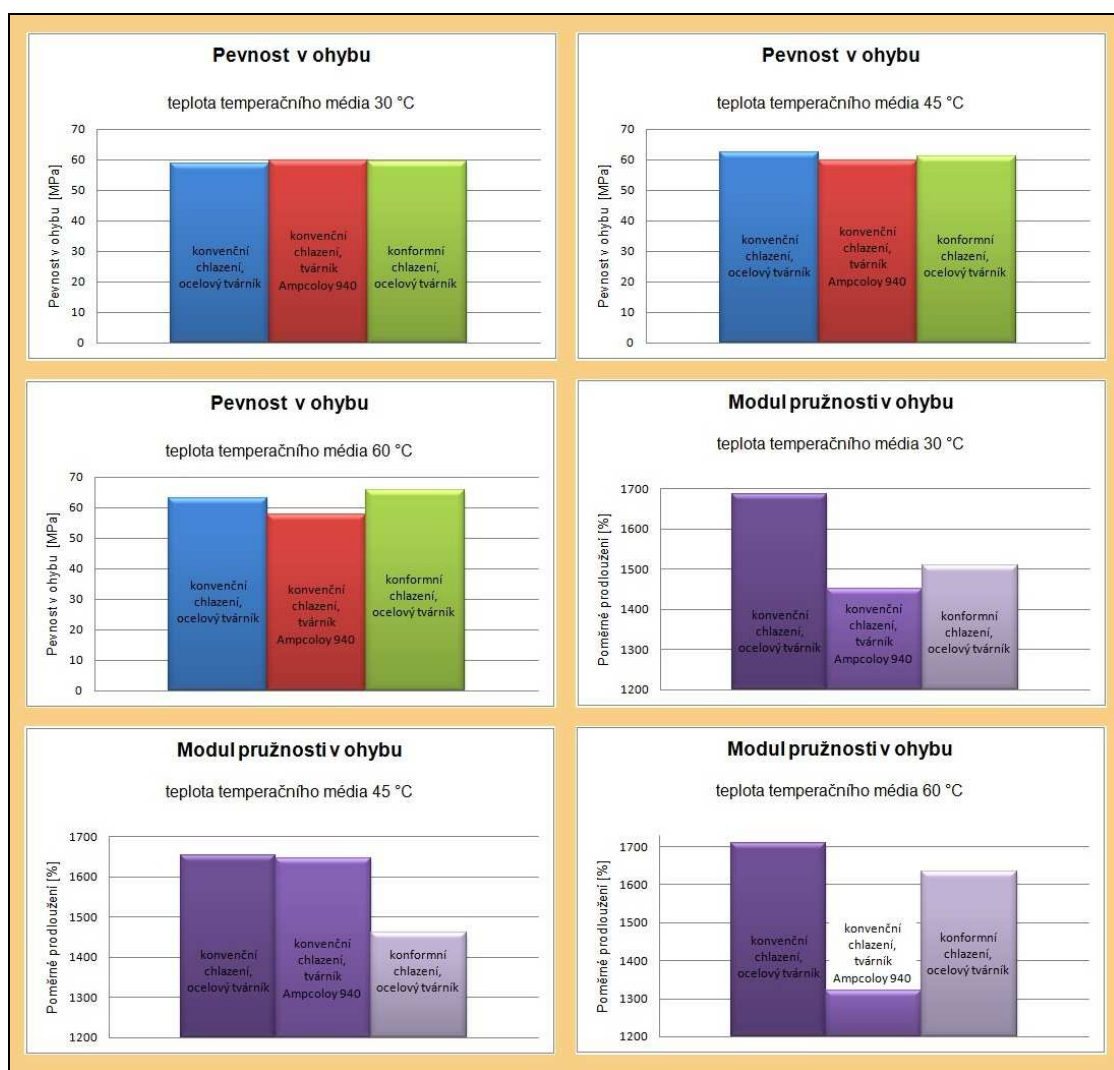
Z grafických závislostí a hodnot tahových vlastností včetně jejich rozptylu, vyjádřeného výběrovou směrodatnou odchylkou, lze konstatovat, že způsob a podmínky temperace nemají vliv na napětí na mezi kluzu a jmenovité poměrné prodloužení na mezi kluzu.



**Obr. 4.4:** Vyhodnocení tahových vlastností výstříků v závislosti na způsobu a podmínkách temperace

Z výsledků stanovení ohybových vlastností a s ohledem na rozptyl měřených hodnot, lze konstatovat, že u výstříků chlazených konformním způsobem chlazení při srovnání s konvenčním chlazením a ocelovým tvárníkem nedošlo k negativnímu ovlivnění pevnosti v ohybu. Při srovnání s tvárníkem ze slitiny mědi bylo zaznamenáno vyšší pevnosti v ohybu, zejména při zvýšené teplotě

temperace (60 °C), a to až o 14 %. Z hodnocení modulu pružnosti v ohybu lze konstatovat, že použitím konformního způsobu chlazení výstřiků dochází k poklesu jeho hodnoty, tento pokles je však s ohledem na rozptyl měřených hodnot minimální. Při srovnání s výstřiky temperovanými konvenčním způsobem (tj. přepážkovým systémem) a vstřikované do tvárníku ze slitiny mědi *Ampcoloy 940* lze zhodnotit konformní způsob chlazení pozitivně, neboť u výstřiků bylo zaznamenáno obdobných nebo vyšších hodnot modulu pružnosti, zejména při vyšší teplotě formy (60 °C), a to až o 23 %.

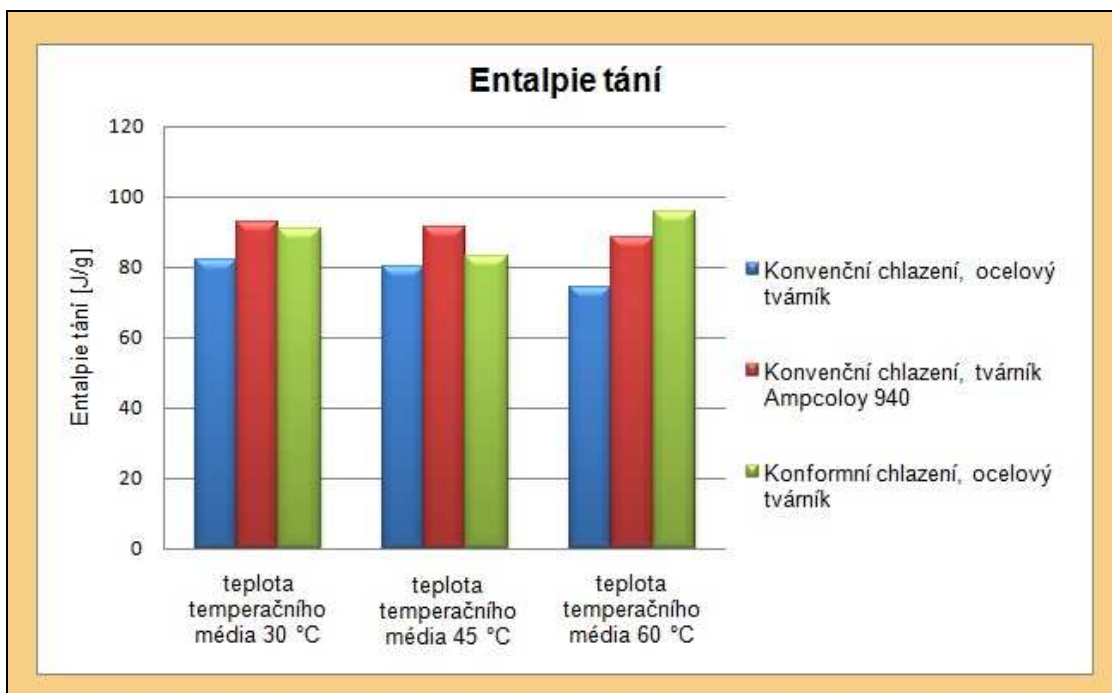


Obr. 4.5: Vyhodnocení ohybových vlastností výstřiků v závislosti na způsobu a podmínkách teploty

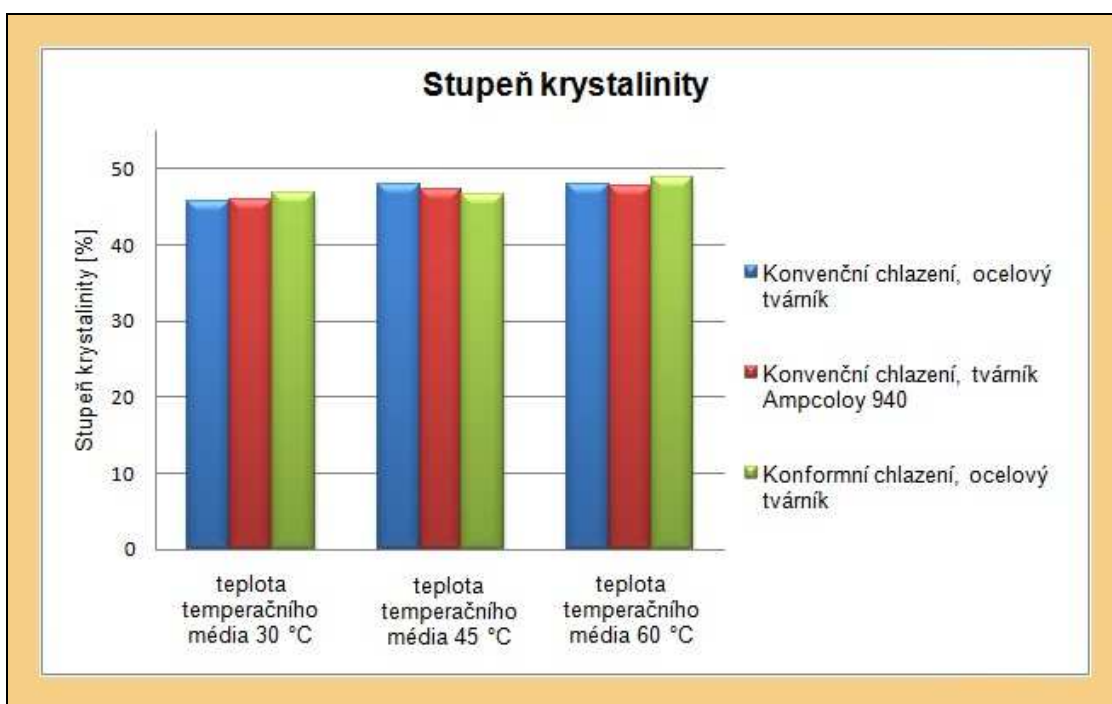
### 4.3. Vyhodnocení krystalického podílu ve struktuře materiálu

Zhodnocení způsobu a podmínek temperace na výsledný obsah krystalické fáze ve struktuře polypropylenu, tedy na stupeň krystalinity materiálu, bylo posuzováno nepřímou metodou *diferenční snímací kalorimetrie* z hodnot entalpie tání výstřiků ve fázi jejich následného ohřevu a přímo metodou *rentgenové difrakce záření X*.

Výsledky *diferenční snímací kalorimetrie* poukazují na skutečnost, že použitím konformního způsobu temperace tvárníku (obdobně jako při použití vysoce tepelně vodivého materiálu) ve vztahu ke konvenčnímu způsobu chlazení ocelového tvárníku přepážkovým systémem bude docházet k vyšší míře uspořádanosti makromolekul na nadmolekulární úrovni (stupni krystalinity) a to na základě zvyšující se hodnoty entalpie tání (viz obr. 4.6), zejména při vyšší teplotě temperace (60 °C), kde rozdíl v hodnotách entalpie tání činí ca. 29 %. Tato změna stupně krystalinity by měla vliv na výsledné mechanické vlastnosti výstřiku. Jejich změnu je však třeba posuzovat také z hlediska velikosti sférolitů ve struktuře výstřiku a strukturních rozdílů po jejich průřezu. Toto hodnocení vzhledem k složení materiálu nebylo možné provést. Výsledky zjištěné na základě *diferenční snímací kalorimetrie* však nebyly *rentgenovou difrakcí záření X* potvrzeny. Naopak z měření stupně krystalinity *širokoúhlou difrakcí záření X* lze konstatovat, že způsob temperačního systému v rozsahu teplot cirkulujícího média 30 °C až 60 °C neovlivňuje výsledný podíl krystalické fáze ve struktuře výstřiku (viz obr. 4.7). Rozdíly ve výsledcích entalpie tání, zjištěné metodou *diferenční snímací kalorimetrie*, lze přisuzovat nepřesnostem, souvisejícím s metodickými faktory, které tuto metodu zatěžují, zejména místu odběru vzorku o velikosti ca. 11 mg, vymezení plochy píku v oblasti tání materiálu, která je přímo úměrná entalpii tání, resp. stupni krystalinity, apod.



**Obr. 4.6:** Entalpie tání v závislosti na způsobu a podmínkách temperace



**Obr. 4.7:** Stupeň krystalinity v závislosti na způsobu a podmínkách temperace

## 5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce vznikla na základě vědecko-výzkumné činnosti katedry strojírenské technologie se záměrem vytvořit v návaznosti na předcházející práce pro potřeby katedry komplexní charakteristiku konvenčních i nekonvenčních temperačních systémů vstřikovacích forem. Cílem této práce bylo popsat možnosti aplikace technologie konformního chlazení vstřikovacích forem jako nekonvenčního systému jejich temperace a experimentálními měřeními ověřit jeho možnosti ve srovnání s konvenčními metodami.

V teoretické části jsou charakterizovány systémy temperace vstřikovacích forem a popsána technologie konformního chlazení i výroba forem nebo tvarových vložek forem pro tuto technologii. Řešení vlivu nekonvenčního způsobu temperace forem konformním chlazením na proces sdílení tepla a rovnoměrnost teplotního profilu uvnitř vstřikovací formy bylo provedeno metodou experimentálního měření teplotních polí při třech různých teplotách cirkulujícího média uvnitř tvarové vložky. Vliv konformního chlazení na kvalitu výstřiků byl hodnocen stanovením jejich tahových a ohybových vlastností, a pro zhodnocení nadmolekulární struktury polymeru byla stanovena závislost zvoleného způsobu a podmínek temperace na výsledný obsah krystalické fáze ve struktuře polypropylenu (stupeň krystalinity materiálu). Důležitou součástí experimentálních měření bylo porovnání konformního chlazení s konvenčními systémy temperace dlouhých tvárnků cirkulující vodou a přepážkovým systémem. Výsledky měření vlivu konformního chlazení na teplotní pole v okolí dutiny formy a fyzikálně-mechanické vlastnosti výstřiků tak mohly být porovnávány se standardně používaným temperačním systémem.

Experimentální měření teplotních polí v dutině formy prokázalo teoretické poznatky o rovnoměrnosti odvodu tepla z dutiny formy. Měření probíhalo postupně za třech teplot cirkulujícího temperačního média, a ve všech případech při srovnání s konvenčními technologiemi temperace použitými v experimentu je konformní chlazení velmi výrazně předčilo v rovnoměrnosti rozložení teplotního pole, což z praktického hlediska přispěje k homogenitě vlastností výstřiku i minimalizaci jeho reziduálního napětí. Z hodnocení mechanických vlastností výstřiku při zatěžování v tahu a ohybu lze konstatovat, že použitím konformního chlazení tvárnku nedošlo (vzhledem k rozptylu měřených hodnot) k výrazným odchylkám v pevnosti v tahu, ohybu, jmenovitého poměrného prodloužení na mezi kluzu v tahu a modulu pružnosti v ohybu.

Experimentálními měřeními a hodnocením výsledků provedených zkoušek se technologie konformního chlazení ukazuje jako více než plnohodnotná náhrada



konvenčních temperačních systémů, vhodná především na aplikaci při temperaci tvarově velmi složitých dílů. Je však nutné podotknout, že konformní chlazení není představováno jako náhrada klasických vrtaných chladících kanálů, ale jako jejich doplněk pro temperaci tvarově složitých oblastí formy. Právě do takových míst je aplikace vložky s konformním chlazením velmi výhodná, a díky principu chlazení – cirkulaci teplotnosného média – je možné tuto vložku napojit do konvenčního temperačního systému bez výrazného zásahu do konstrukce formy.

Ekonomické hledisko aplikace forem (nebo jejich vložek) s konformním chlazením není v této práci řešeno, ale dle poznatků z praxe lze dosáhnout významných úspor ve všech typech výroby dle ročního objemu produkce [26].



## Seznam použité literatury

- [1] KREBS, Josef. *Teorie a technologie zpracování plastů*. Liberec: VŠST v Liberci, 1981.
- [2] BĚHÁLEK, Luboš, LENFELD, Petr et al. Temperace vstřikovacích forem s ohledem na vlastnosti a morfologii výstřiků. *Strojírenská technologie*. Ústí nad Labem: UJEP Ústí nad Labem, 2005, X, zvláštní číslo.
- [3] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006.
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. Speciální temperační prostředky. In: SOVA, A a J KREBS. *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashofer, Nakladatelství spol. s r.o., 2004, s. 12.
- [5] Přehled modelů vírových trubic. In: [online]. 2011. vyd. [cit. 2012]. Dostupné z: [http://www.lontech.cz/download-826-prehled\\_modelu\\_virovych\\_trubic-pdf.html](http://www.lontech.cz/download-826-prehled_modelu_virovych_trubic-pdf.html)
- [6] Temperační jednotky. [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.novotny-chlazení.cz/prumyslova-temperace/sella/handy>
- [7] LENFELD, Petr. *Technologie II: 2. část (zpracování plastů)*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006.
- [8] Tlakové vodní temperační přístroje. [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.amcz.cz/katalog/temperace-a-chlazení/tlakove-vodni-temperacni-pristroje.htm>
- [9] Temperační přístroj TAB 3: Technická specifikace. In: [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: [http://www.amcz.cz/editor/image/produkty\\_kategorie1/File/TAB%203.pdf](http://www.amcz.cz/editor/image/produkty_kategorie1/File/TAB%203.pdf)
- [10] Vstřikovací formy. *Ústav strojírenské technologie: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: [ust.fme.vutbr.cz/.../htn\\_\\_tvareci\\_nastroje\\_vstrikovaci\\_formy\\_\\_zak.p...](http://ust.fme.vutbr.cz/.../htn__tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy__zak.p...)
- [11] HASALA, Lukáš. *Výroba výukového modelu systémů chladících systémů vstřikovacích forem* [online]. Zlín, 2010 [cit. 2012]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [12] ČERVINKOVÁ, Petra. *Konformní chlazení vstřikovacích forem*. Liberec, 2010. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [13] Vstřikovací formy: temperační systém. [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: [www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/tzn/c6/TS.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c6/TS.pdf)
- [14] Konformní chlazení. [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.konformnichlazení.cz>

- [15] Chlazení forem aplikací konformního chlazení. In: *Http://www.plasticportal.sk* [online]. 2010 [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.eu/sk/chlazení-forem-aplikaci-konformniho-chlazení/c/260>
- [16] BĚHÁLEK, Luboš. Teplotní analýza vstřikovacích forem s ohledem na kvalitu plastových výrobků. In: *Mezinárodní vědecké sympozium: u příležitosti 25. výročí Katedry tváření a plastů* [online]. TU v Liberci, 2004 [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.eu/sk/chlazení-forem-aplikaci-konformniho-chlazení/c/260>
- [17] MAYER, Siegfried. Optimised mould temperature control procedure using DMLS. [online]. 2009 [cit. 2012]. Dostupné z: [www.plasticstoday.com](http://www.plasticstoday.com)
- [18] NOVOTNAK, David J. Porous Metallic Tooling May Improve the Productivity and Quality of Injection Molded Plastic Parts. [online]. Bridgeville, PA, USA, 2006 [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.carttech.com/>
- [19] Ranguého vírová trubice. [online]. 2008. vyd. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.designtech.cz/c/fem/rangueho-virova-trubice.html>
- [20] BĚHÁLEK, L. – LENFELD, P.: Temperační systém s vysoce tepelně vodivým materiálem, In: 9. Mezinárodní konference Vstřikování plastů, Praha 2002, s. 67-73,
- [21] BOBEK, Jiří. *Aplikace tepelné trubice ve fázi chlazení procesu vstřikování polypropylenu*. Liberec, 2007. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [22] POUPA, T.: *Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Ranque-Hilsch vírovou trubicí*. Liberec, 2005. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [23] The principle of MECOBOND®. [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.mecobond.de/english/index.htm>
- [24] Conformal cooling. *LBC LaserBearbeitungsCenter GmbH* [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.lasergenerieren.de/en/conformal-cooling.php>
- [25] Lasergenerating. *LBC LaserBearbeitungsCenter GmbH* [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.lasergenerieren.de/en/conformal-cooling.php>
- [26] Conformal cooling: Why use it now?. *http://www.plasticstoday.com* [online]. [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: <http://www.plasticstoday.com/imm/articles/tooling-conformal-cooling-1209>
- [27] DUBERA, Branislav a František GREŠKOVIČ. Conformal cooling for plastics injection moulding. In: [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: [www.it-strojar.sk](http://www.it-strojar.sk)

- [28] SEKERKA, Vít. *Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [29] Konformní chlazení: využití technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS) při výrobě nástrojů. [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz>
- [30] *DMLS: Direct Metal Laser Sintering* [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz/>
- [31] *INNOMIA a.s.: specialista na 3D tisk kovů a plastů* [online]. [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/>
- [32] *Pořad Prizma: 3D tiskárny*. Praha: Česká televize, 2012. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/10095523948-prizma/212411058100010/video/>
- [33] Polypropylen Mosten MT 230: Typické vlastnosti a použití. *UNIPETROL RPA, s.r.o.* [online]. [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.unipetrolrpa.cz/cs/nabidka-produktu/petrochemicke-produkty/polyolefiny/product-detail.jsp?product=MT230&category=PP&lang=cs>
- [34] MEISSNER, B., ZILVAR, V. *Fyzika polymerů*. Praha: SNTL/ALFA, 1987
- [35] BALDRIAN, J. *Širokoúhlý rozptyl záření*. In: *Základy fyziky polymerů*. Praha: ÚMCH AV ČR, 1987

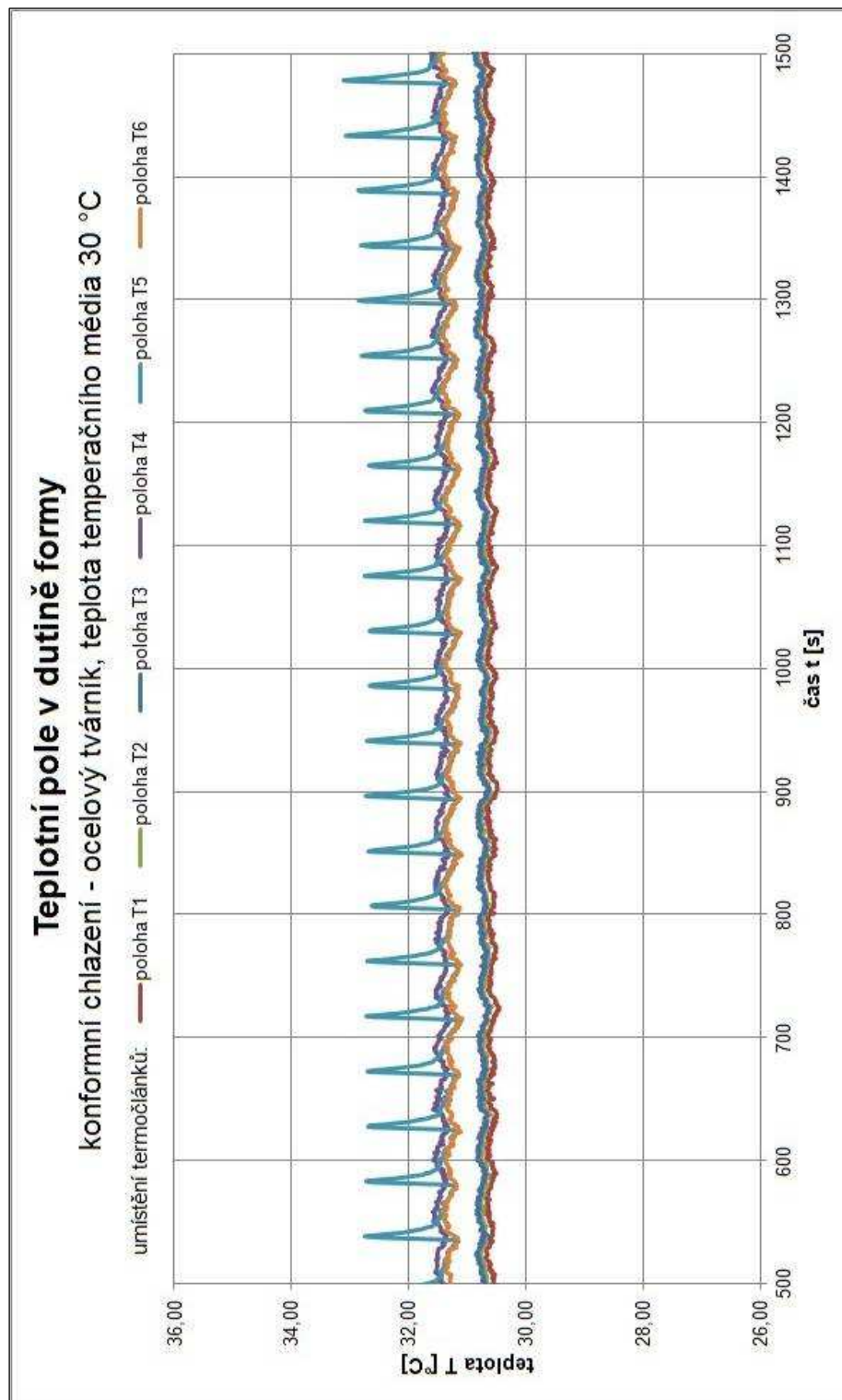


## **Přílohy**

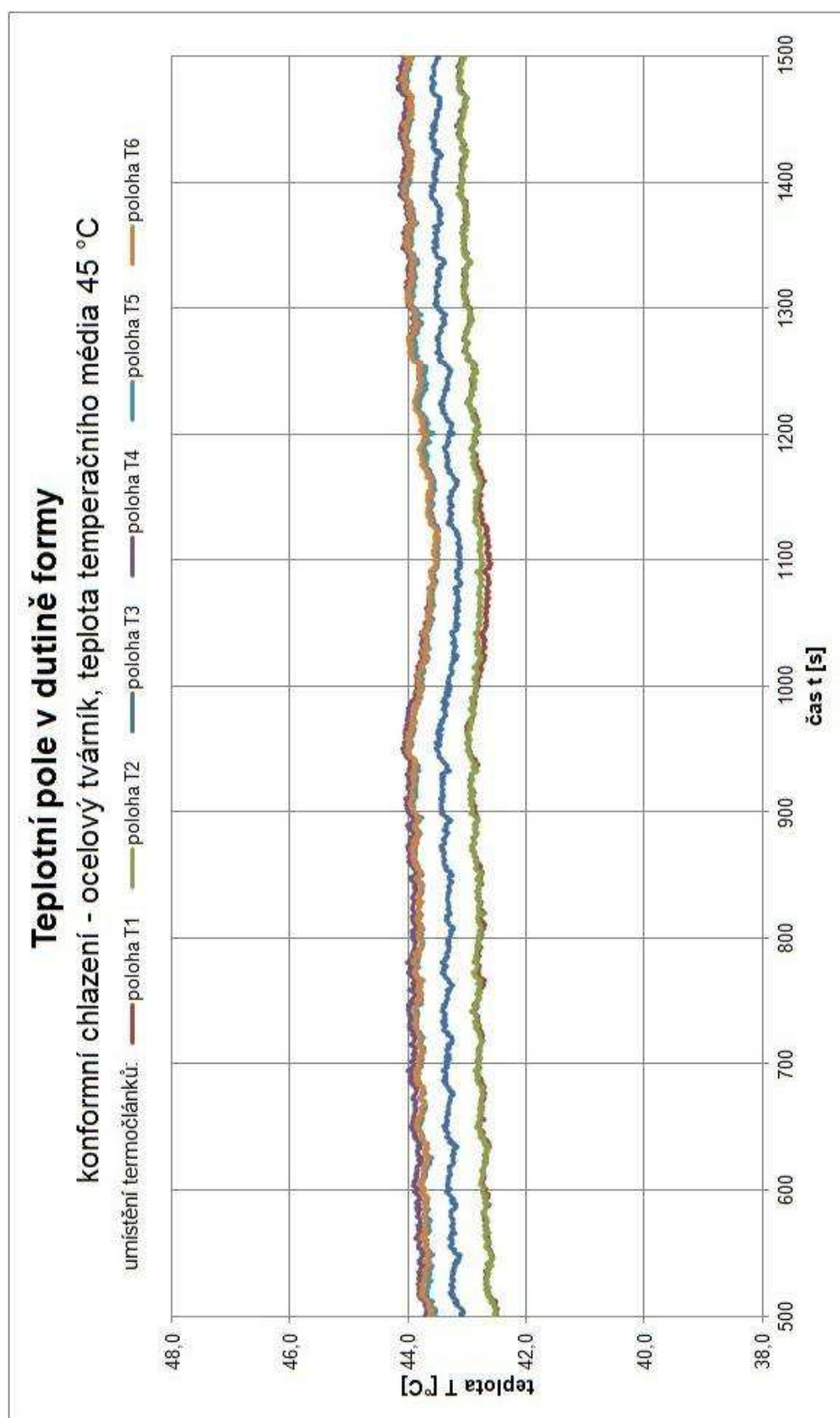
### **Seznam příloh:**

- Příloha 1 – Průběhy teplotních polí v závislosti na čase  
za různých podmínek teploty**
- Příloha 2 – Průběhy zkoušky tahem v závislosti na podmínkách  
teploty**
- Příloha 3 – Průběhy zkoušky ohybem v závislosti na  
podmínkách teploty**
- Příloha 4 – DSC termogramy v závislosti na podmínkách  
teploty**
- Příloha 5 – Difraktogramy polypropylenu v závislosti  
podmínkách teploty**

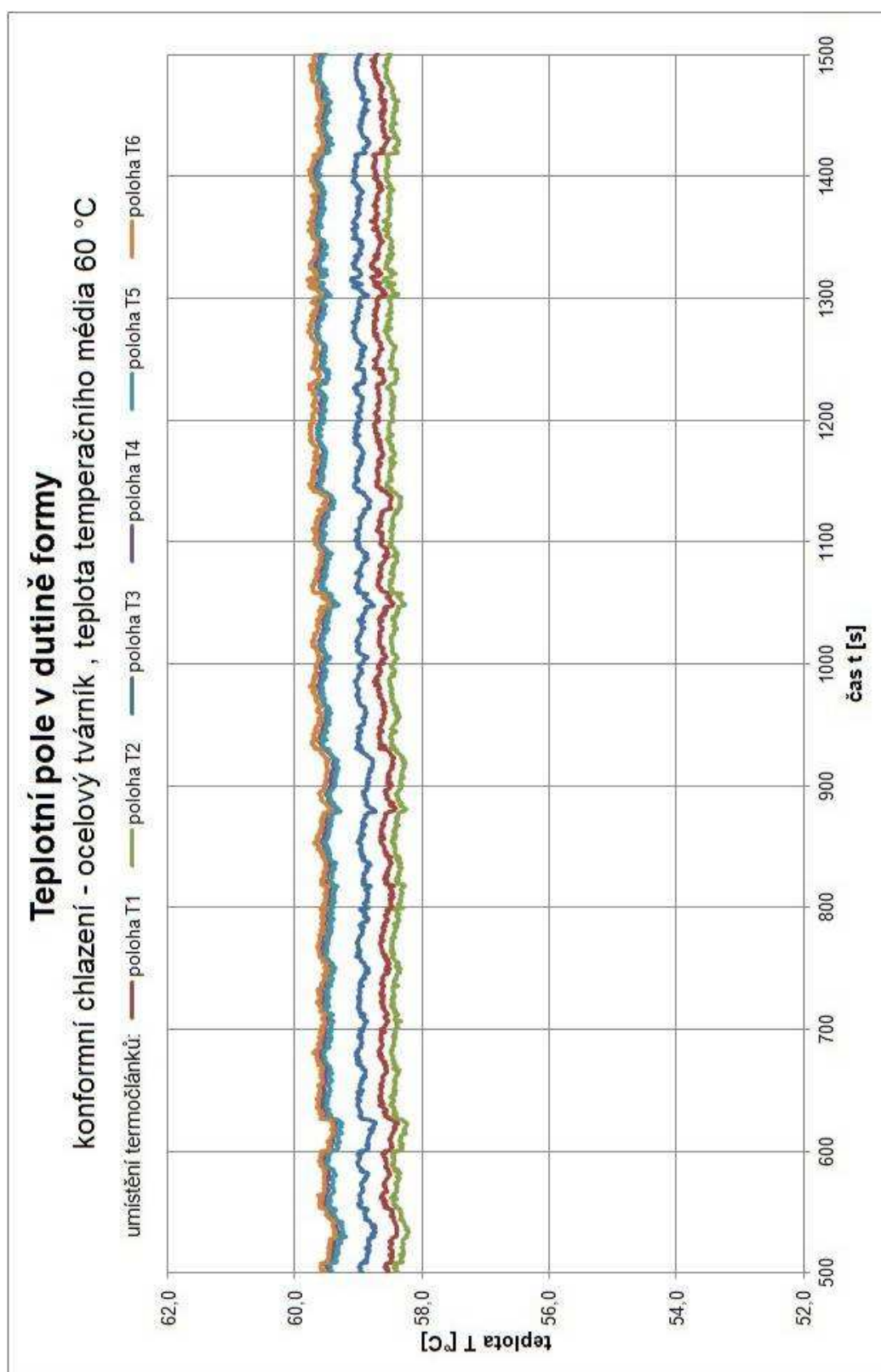
## Příloha 1: Průběhy teplotních polí v závislosti na čase pro použité způsoby a podmínky temperace



Obr. P1.1: Časový průběh teplotních polí u konformního chlazení a teploty temperačního média 30 °C

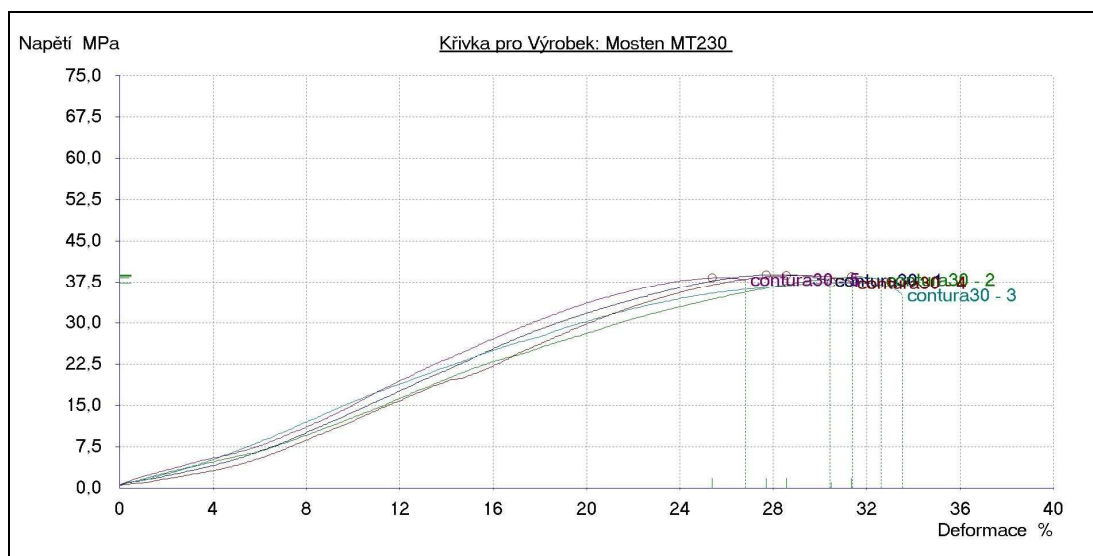


Obr. P1.2: Časový průběh teplotních polí u konformního chlazení a teploty temperačního média 45 °C

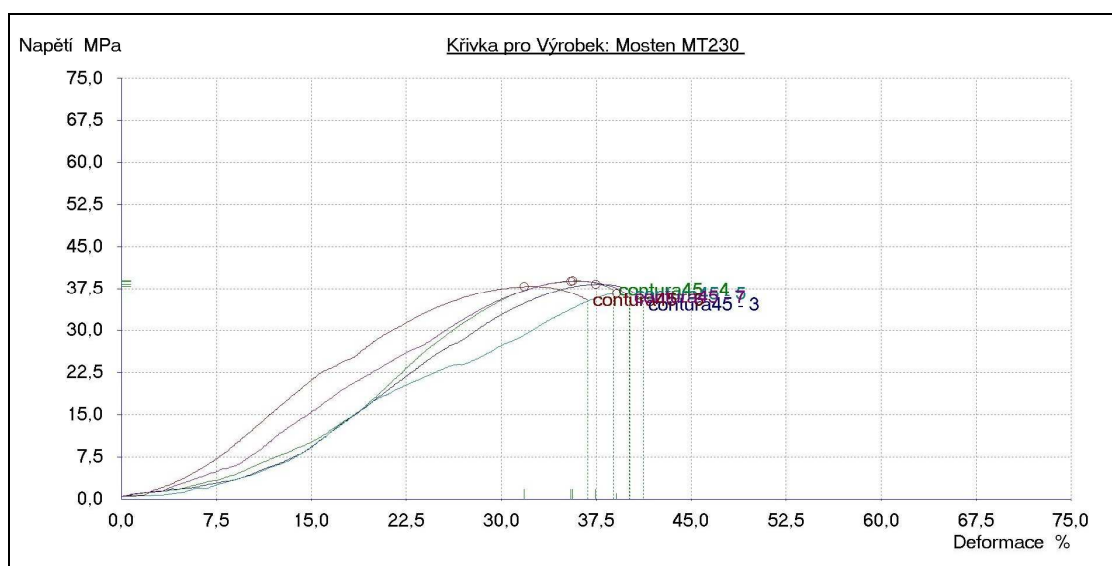


Obr. P1.3: Časový průběh teplotních polí u konformního chlazení a teploty temperačního média 60 °C

## Příloha 2: Průběhy zkoušky tahem v závislosti na podmínkách temperace

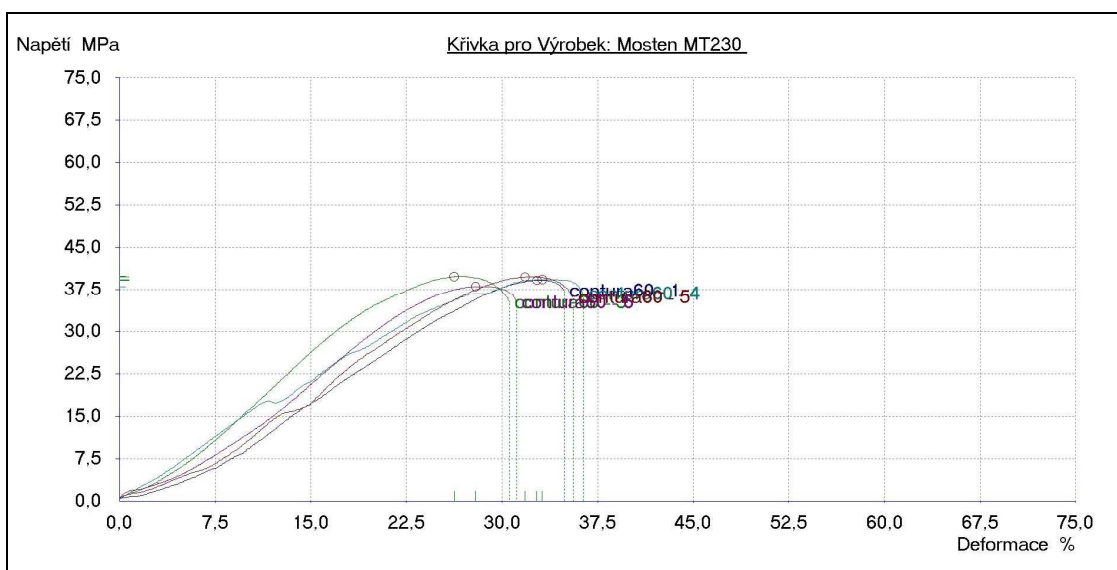


**Obr. P2.1:** tahový diagram - konformní chlazení, teplota temperačního média 30 °C



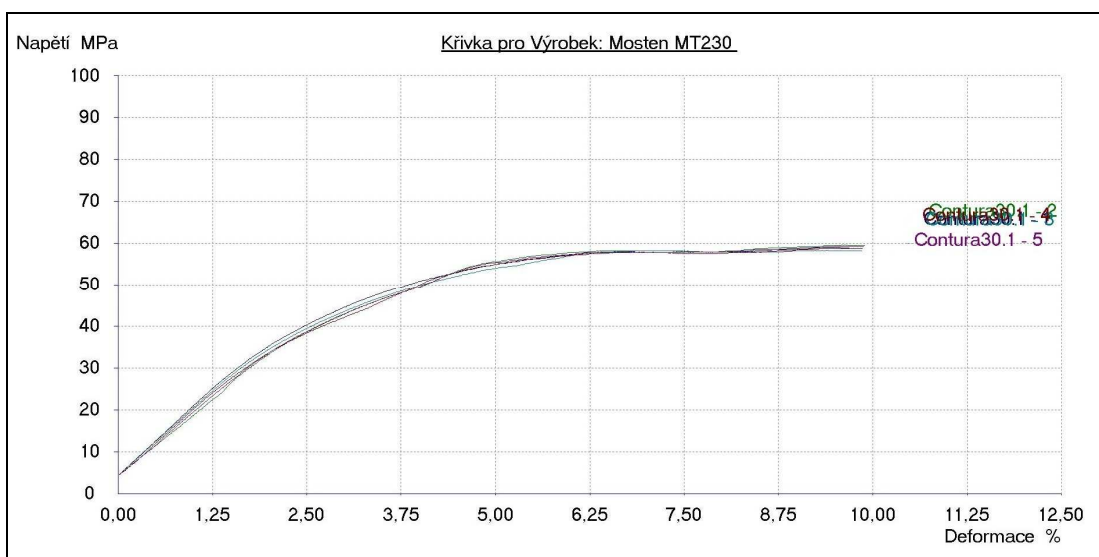
**Obr. P2.2:** tahový diagram - konformní chlazení, teplota temperačního média 45 °C



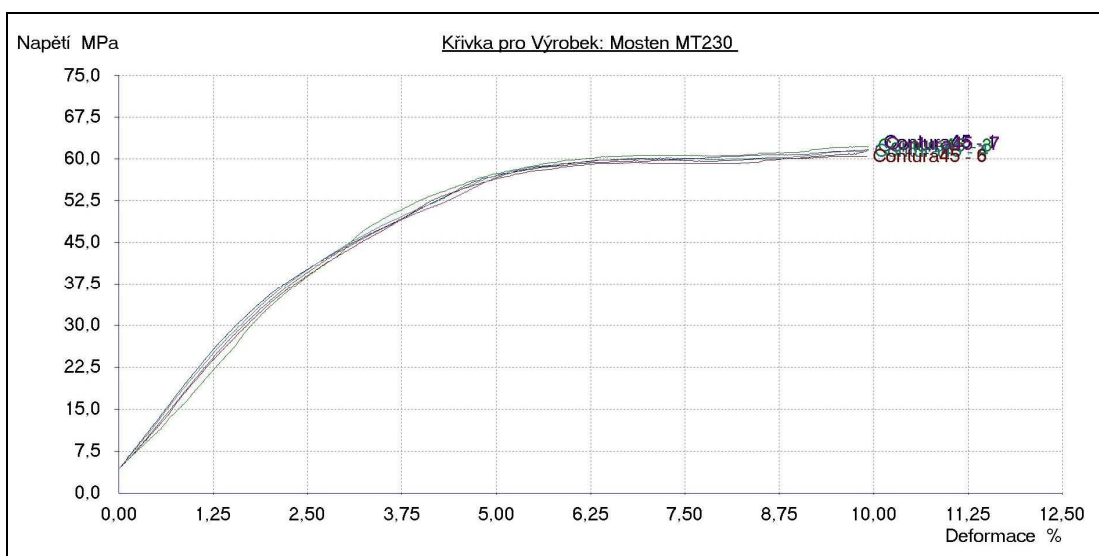


Obr. P2.3: tahový diagram - konformní chlazení, teplota temperačního média 60 °C

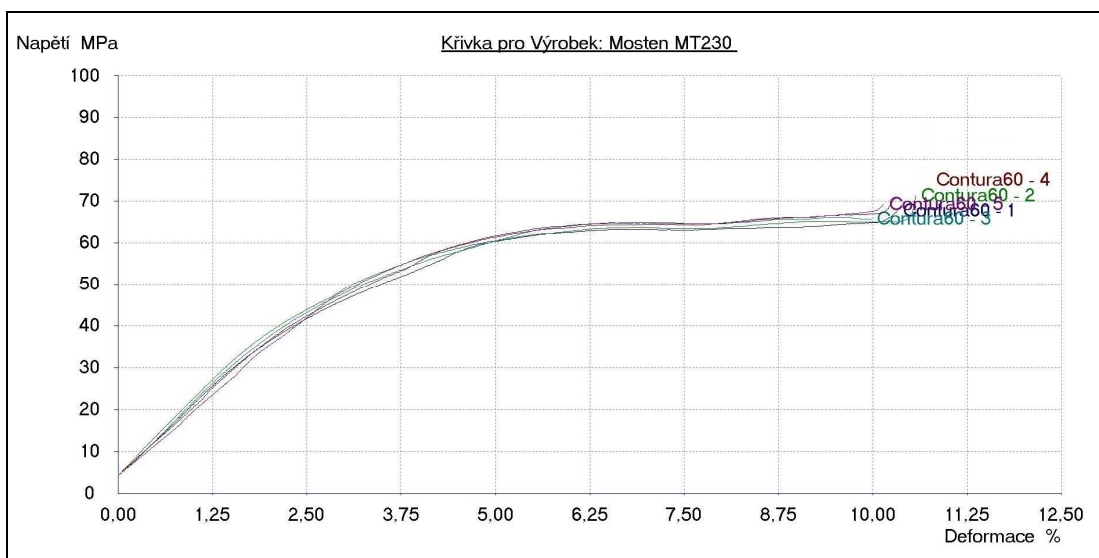
### Příloha 3: Průběhy zkoušky ohybem v závislosti na podmínkách temperace



Obr. P3.1: diagram zkoušky ohybem - konformní chlazení, teplota temperačního média 30 °C

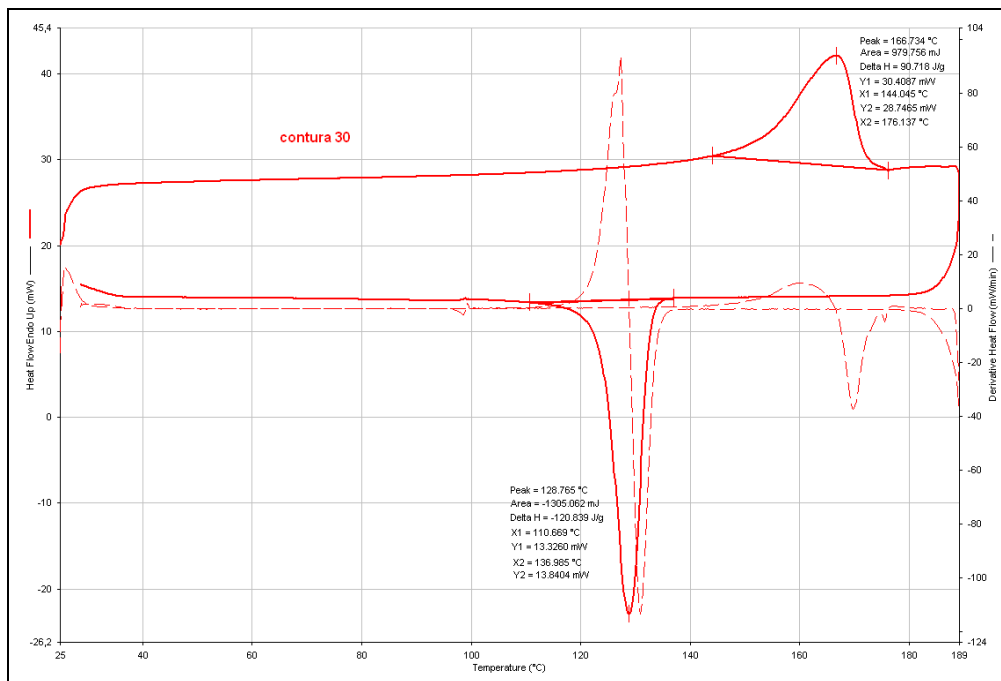


**Obr. P3.2:** diagram zkoušky ohybem - konformní chlazení,  
teplota temperačního média 45 °C

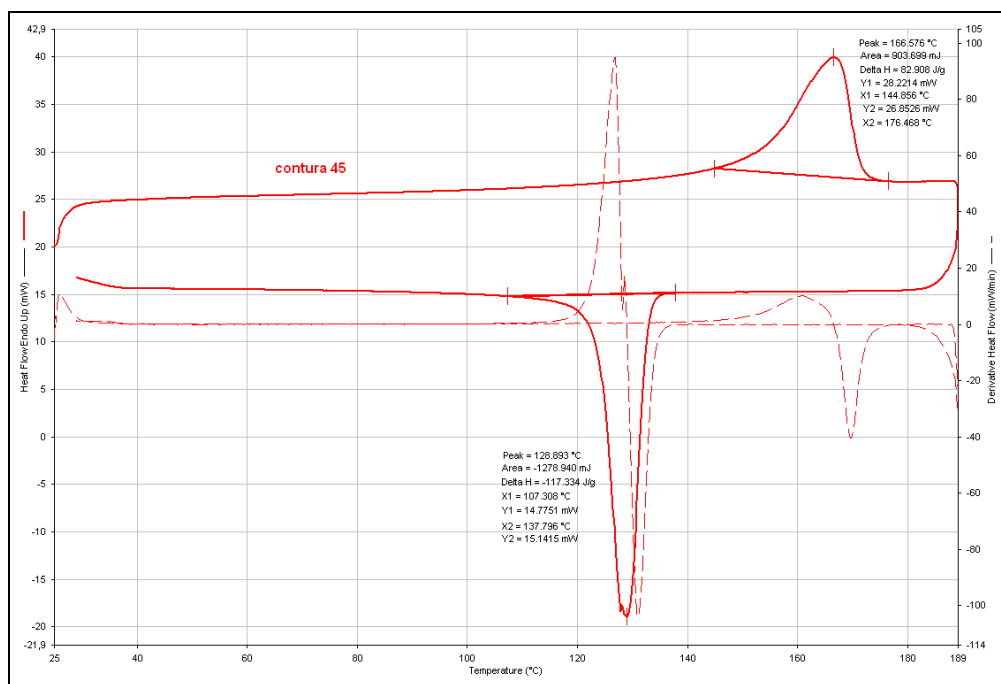


**Obr. P3.3:** diagram zkoušky ohybem - konformní chlazení,  
teplota temperačního média 60 °C

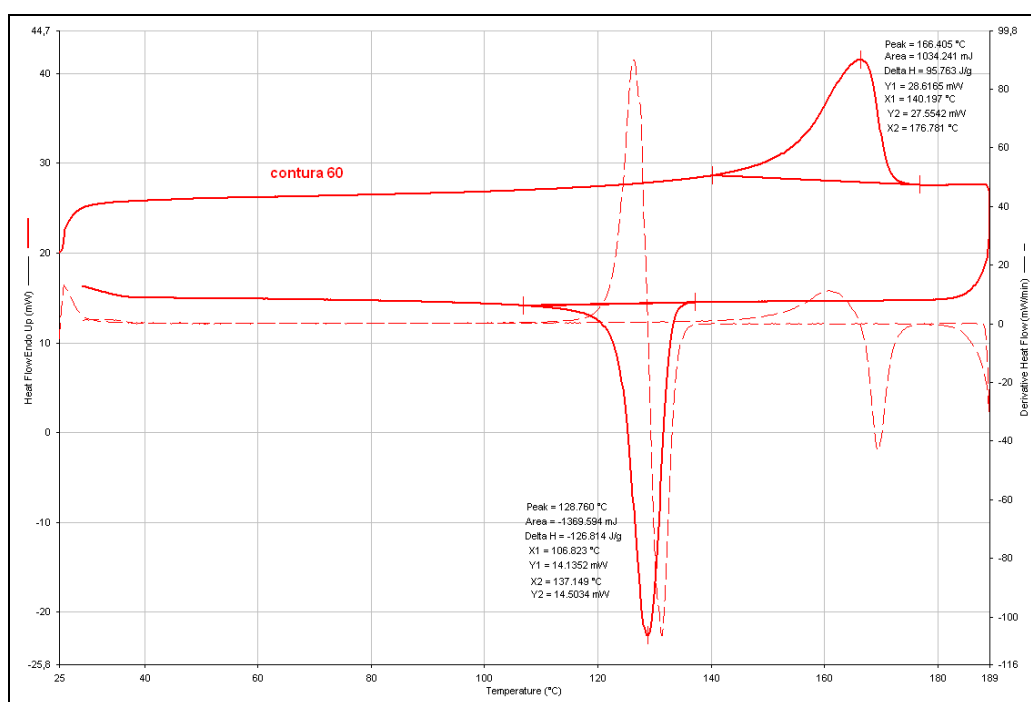
## Příloha 4: DSC termogramy v závislosti na podmínkách temperace



Obr. P4.1: Vyhodnocení termogramu – konformní chlazení,  
teplota temperačního média 30 °C

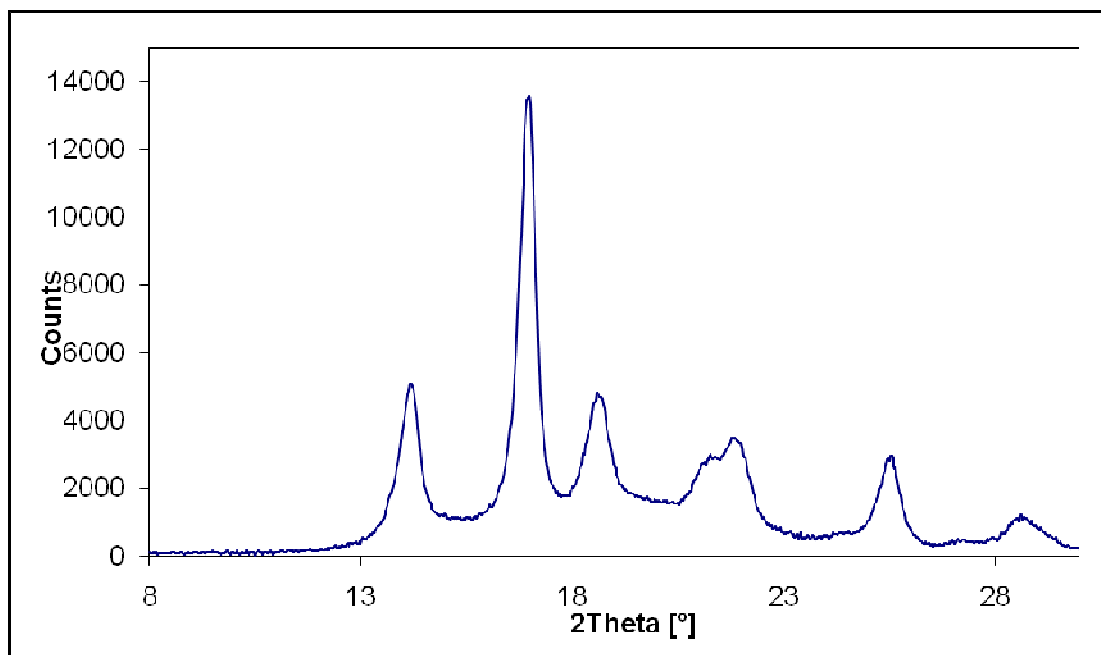


Obr. P4.2: Vyhodnocení termogramu – konformní chlazení,  
teplota temperačního média 45 °C

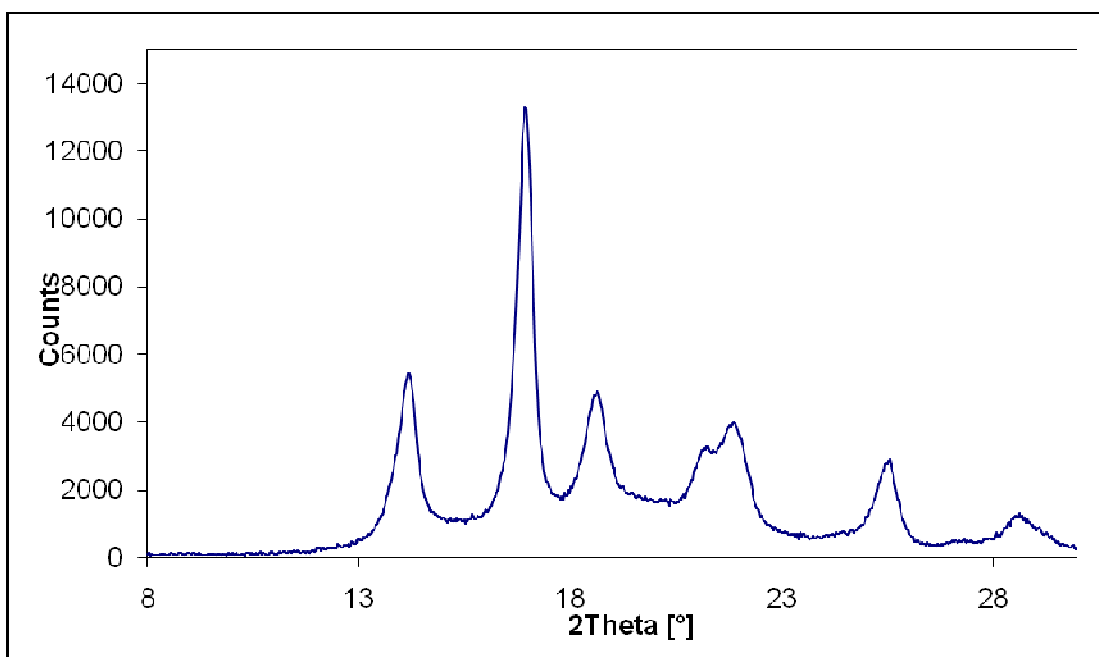


Obr. P4.1: Vyhodnocení termogramu – konformní chlazení,  
teplota temperačního média 60 °C

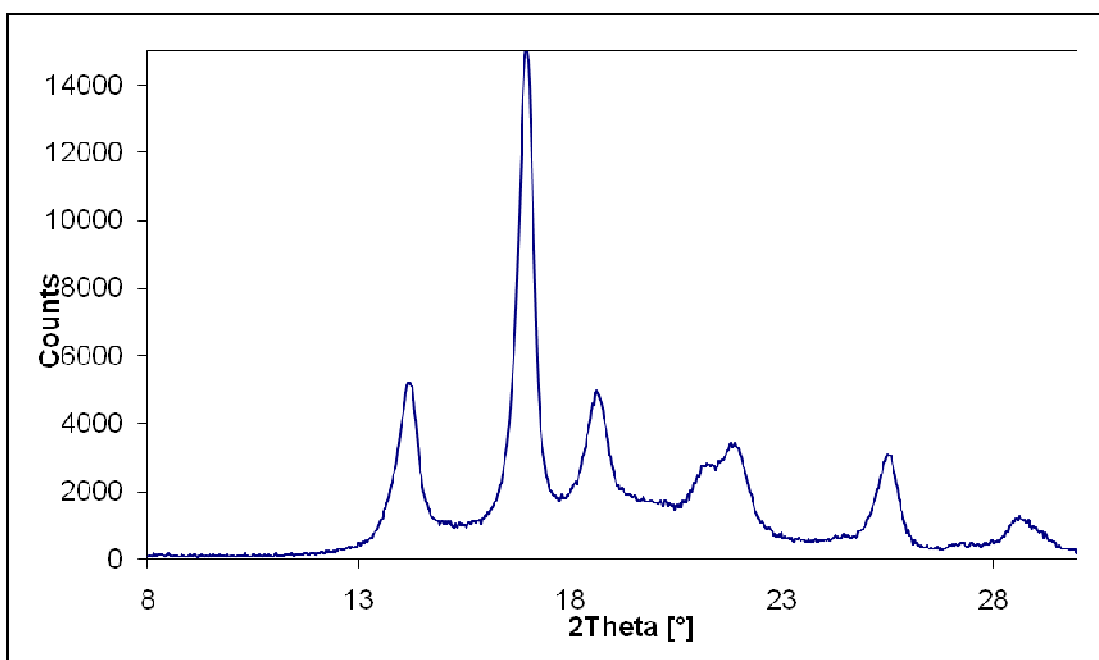
#### Příloha 4: Difraktogramy polypropylenu v závislosti podmínkách temperace



Obr. P5.1: Difraktogram pro konformní chlazení a teplotu temperačního média 30 °C



**Obr. P5.1:** Difraktogram pro konformní chlazení a teplotu temperačního média 45 °C



**Obr. P5.1:** Difraktogram pro konformní chlazení a teplotu temperačního média 60°C

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with head of the thesis and a consultant.

Date

Signature